

物联网工程与技术规划教材

# 基于 ADS 物联网射频电路 设计与仿真技术

蔡光卉 主 编  
梁 川 郑树文 副主编  
杨 军 主 审

電子工業出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书简要概述了物联网和射频通信电路的基本知识,按照“专业知识——软件使用——基础实验——系统级实验”的顺序,着重分析和讲解了基于 ADS 2012 射频通信电路的设计与实现。全书共 7 章,第 1 章为物联网与射频电路基础知识介绍,第 2~5 章为 ADS 2012 操作基础和仿真设计方法,第 6~7 章为射频电路基础实验和系统实验设计实例。本书基于实例项目,详细介绍了相关设计原理、结构框图、基本步骤,并提供了设计思路和优化方案,也穿插了一些经验技巧和注意事项,可有效帮助读者提升理论知识水平和实际操作能力。本书配套教学资源有电子课件及习题解答。

本书适用于电子信息、计算机、物联网、通信工程等专业本科、研究生,及从事电子线路、射频技术研发的工程技术人员。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

基于 ADS 物联网射频电路设计与仿真技术 / 蔡光卉主编. —北京: 电子工业出版社, 2014.8

物联网工程与技术规划教材

ISBN 978-7-121-23723-2

I. ①基… II. ①蔡… III. ①射频电路—电路设计—计算机辅助设计—软件包—高等学校—教材

IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 147927 号

策划编辑: 任欢欢

责任编辑: 郝黎明

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.5 字数: 499.2 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版

印 次: 2014 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

# 前 言

物联网是新一代信息技术的重要组成部分，被称为继计算机、互联网之后世界信息产业发展的第三次浪潮。其含义是把生活中的各类物品和它们的属性标识连到互联网上，实现智能化识别和管理。目前，物联网技术具有广泛的应用领域，有望成为推动经济高速发展的“重要生产力”。

通信是物联网的关键，没有通信，物联网感知的大量信息就无法进行有效交换与共享，从而也就不能利用这些信息产生丰富的物联网应用，物联网通信包含有线和无线通信技术，而最能体现物联网特征的是无线通信技术，在无线通信技术中又离不开射频电路。射频电路的工作频率不断提高，从几百 MHz 到 GHz 频率的应用越来越多。目前，本科生实验内容多以单元电路的验证为主，所涉及的电路频率也大多在 10MHz 以下，传统实验模式耗材损失大，学生操作不便。因此我们需要利用新的方法和手段来设计射频电路实验。

由美国安捷伦公司研制的大型 EDA 软件 ADS (Advanced Design System) 是当今主流射频电路设计的开发软件，因其强大的功能、丰富的模板支持和高效准确的仿真能力（尤其在射频微波领域），已成为当今国内各高校和研究所使用最多的微波/射频电路和通信系统的设计仿真软件。ADS 软件具有强大的功能与友好的界面，在射频和微波电路设计、通信系统设计、射频集成电路 (RFIC) 设计、仿真方面具有很大优势。本书是作者结合近几年的 ADS 实践和教学经验，依托云南大学电子信息技术实验教学中心，针对目前本科生射频电路实验面临的实际问题，参考了大量设计书籍和技术文献，组织编写的实践教材。

本书首先介绍了物联网和射频电路的基础知识，然后重点讲解了 ADS 基本功能和使用方法，并结合实例对典型应用进行讲解。在实例讲解上，总结了通信领域经常用到的各类电子通信器件并在此基础上详细介绍了设计原理、结构框图、基本步骤和流程，提供了设计思路和优化方案，也穿插了一些经验技巧和注意事项，在潜移默化的过程中提高读者的理论知识和实践动手操作能力，迅速帮助读者提高基于 ADS 的射频通信电路设计分析综合实践能力。全书语言简洁，结构清晰，内容系统针对性强，基础知识和实际工程结合，紧紧围绕实用原则，然后由浅入深，安排应用实例精讲，便于读者深入学习和研究。

全书分为 7 章，共两大部分。基础知识概述部分包括前 5 章：第 1 章物联网与射频电路基础，第 2 章 ADS 2012 简介，第 3 章 ADS 设计向导，第 4 章 ADS 仿真设计与实例，第 5 章 ADS 通信系统仿真；实践部分包括：第 6 章 ADS 基础实验，第 7 章 ADS 通信系统综合实验。

本书配套教学资源有电子课件及习题解答，请任课教师登录华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn> 免费注册下载。

全书由云南大学信息学院杨军教授主审，蔡光卉编写第 1~5 章，梁川编写第 6 章，郑树文编写第 7 章，全书由蔡光卉副教授统稿。李红晔、孙洪超、马晓聪、肖斌、李雪和万昌慧同学对本书的编写也作出了贡献。

本书在编写过程中得到云南大学信息学院的领导以及其他实验教师的关怀和支持，在此向他们致以诚挚的谢意。

在本书的编写过程中，参考和引用了很多同类资料的相关内容和美国安捷伦公司的有关技术资料，在此向这些资料的作者和安捷伦公司致以深深的感谢。

由于作者水平有限，本书难免有疏漏和不足之处，望读者谅解。

编 者



# 目 录

第 1 章 物联网与射频电路基础 .....	1	3.3 使用向导的应用 .....	69
1.1 物联网综述 .....	1	3.3.1 原理图生成 .....	69
1.1.1 物联网的定义 .....	1	3.3.2 仿真结果说明 .....	72
1.1.2 物联网与互联网的比较 .....	2	3.3.3 观察分析 .....	73
1.1.3 物联网的体系架构 .....	3	3.3.4 查看元件参数 .....	75
1.1.4 关键技术 .....	4	习题 .....	76
1.1.5 物联网应用 .....	4	第 4 章 ADS 仿真设计与实例 .....	77
1.2 射频电路基础 .....	5	4.1 仿真概述 .....	77
1.2.1 射频定义及应用 .....	6	4.1.1 仿真功能分类 .....	77
1.2.2 传输线与史密斯圆图 .....	7	4.1.2 仿真功能综述 .....	78
1.2.3 射频网络分析基础 .....	16	4.2 直流仿真 .....	80
习题 .....	19	4.2.1 仿真界面 .....	80
第 2 章 ADS 2012 简介 .....	20	4.2.2 仿真操作 .....	81
2.1 ADS 概述 .....	20	4.2.3 仿真例程 .....	86
2.1.1 ADS 的仿真分析方法 .....	20	4.3 交流仿真 .....	93
2.1.2 ADS 功能分析 .....	21	4.3.1 仿真界面 .....	93
2.1.3 ADS 兼容性分析 .....	22	4.3.2 仿真操作 .....	94
2.1.4 初识 ADS .....	23	4.3.3 仿真例程 .....	98
2.2 ADS 界面介绍 .....	23	4.4 S 参数仿真 .....	103
2.2.1 主界面 .....	23	4.4.1 仿真界面 .....	103
2.2.2 原理图界面 .....	34	4.4.2 仿真操作 .....	106
2.2.3 布局图界面 .....	48	4.4.3 仿真例程 .....	110
2.2.4 数据显示界面 .....	49	4.5 谐波平衡仿真 .....	114
习题 .....	53	4.5.1 仿真界面 .....	114
第 3 章 ADS 设计向导 .....	54	4.5.2 仿真操作 .....	116
3.1 设计流程 .....	54	4.5.3 仿真例程 .....	123
3.1.1 新建项目 .....	54	4.6 电路包络仿真 .....	128
3.1.2 工程实例设计 .....	54	4.6.1 仿真界面 .....	128
3.1.3 工程实例分析 .....	57	4.6.2 仿真操作 .....	129
3.2 原理图优化与分析 .....	61	4.6.3 仿真例程 .....	133
3.2.1 原理图优化 .....	61	4.7 瞬态仿真 .....	137
3.2.2 原理图分析 .....	64	4.7.1 仿真界面 .....	137
		4.7.2 仿真操作 .....	138

4.7.3 仿真例程 .....	143	6.6 功率放大器 .....	207
习题 .....	146	6.6.1 放大器的基本原理 .....	207
<b>第 5 章 ADS 通信系统仿真</b> .....	147	6.6.2 设计实现低噪声放大器 .....	210
5.1 设计基础级通信系统 .....	147	6.7 混频器 .....	230
5.1.1 新建工程 .....	147	6.7.1 混频器基本原理 .....	230
5.1.2 通信系统仿真操作 .....	151	6.7.2 设计实现混频器 .....	236
5.2 通信系统实例分析 .....	156	6.8 功率分配器 .....	243
5.2.1 实例仿真设计 .....	156	6.8.1 功率分配器基本原理 .....	243
5.2.2 仿真结果分析 .....	162	6.8.2 设计实现功率分配器 .....	248
习题 .....	163	6.9 压控振荡器 .....	256
<b>第 6 章 ADS 基础实验</b> .....	164	6.9.1 压控振荡器基本原理 .....	256
6.1 匹配电路 .....	164	6.9.2 设计实现振荡器 .....	258
6.1.1 设计向导实现匹配电路 .....	164	习题 .....	265
6.1.2 Smith 图实现匹配电路 .....	167	<b>第 7 章 ADS 通信系统综合实验</b> .....	266
6.2 衰减器 .....	176	7.1 通信电路射频发射系统 .....	266
6.2.1 衰减器基本原理 .....	176	7.1.1 设计射频发射系统 .....	266
6.2.2 设计实现有源衰减器 .....	177	7.1.2 射频发射系统仿真与实现 .....	269
6.3 移相器 .....	180	7.2 通信电路射频接收系统 .....	272
6.3.1 移相器基本原理 .....	180	7.2.1 设计射频接收系统 .....	272
6.3.2 设计实现移相器 .....	180	7.2.2 射频接收系统仿真与实现 .....	277
6.4 锁相环 .....	183	7.3 通信电路中射频宽带放大器设计与仿真 .....	285
6.4.1 锁相环基本原理 .....	183	7.3.1 设计指标 .....	286
6.4.2 设计实现锁相环 .....	186	7.3.2 射频宽带放大器的设计与仿真 .....	286
6.5 滤波器 .....	196	习题 .....	305
6.5.1 集总参数低通滤波器设计向导 .....	196	<b>参考文献</b> .....	306
6.5.2 设计集总参数低通滤波器 .....	201		

# 第1章 物联网与射频电路基础

物联网是新一代信息技术的重要组成部分。顾名思义，物联网就是物物相连的互联网。物联网通过智能感知、识别技术与互联网的应用融合，被称为继计算机、互联网之后世界信息产业发展的第三次浪潮。随着物联网理念日趋成熟，其涉及的应用领域也越来越广泛，从智能安防到智能电网，从二维码普及到智慧城市落地。具体来看，我国物联网技术已经融入到纺织、冶金、机械、石化、制药等工业制造领域，可以预见物联网将逐渐涉及生活各个领域，成为下一个推动世界高速发展的“重要生产力”。

与此同时，通信系统也正以惊人的速度向前发展，现代通信系统越来越复杂。从现有的射频、微波应用，可以看出射频电路相关领域具有很大的发展潜力，并有望成为未来许多应用富有成效的资源之一。为了实现无线电远程传输信息、无线电探测和测距、无线电近距离组网和数据传输以及无线电无接触识别等功能，人们发明了射频识别设备。而射频识别技术正是物联网关键技术且应用最广，因此射频电路与物联网理念具有密不可分的联系。

射频简称 RF，射频就是射频电流，它是一种高频交流变化电磁波的简称。传统实验只适合低频电路的设计，为了满足射频电路的频段要求，我们需要建立新的射频电路设计体系。此外，随着通信系统越来越复杂，电路各项参数的要求越来越严格（如低噪声放大器的噪声系数），产品功能的要求越来越多样化，而产品设计周期却越来越短，因此传统的设计方法已经不能满足现代电路设计的要求，借助于微波仿真软件进行电路设计已经成为必然趋势，美国安捷伦（Agilent）公司的大型 EDA 软件 ADS（Advanced Design System）凭借其强大的功能与友好的界面，成为当今主流设计开发软件。ADS 软件在完成射频和微波电路设计、通信系统设计、射频集成电路（RFIC）设计方面和数字信号处理仿真设计具有很大优势，同时包含时域电路仿真、频域电路仿真、三维电磁仿真、通信系统仿真等功能，并且可以实现从模块到系统的设计，是当前射频和微波电路设计的首选工程软件。

本章将分别对物联网和射频电路的概念和应用进行介绍，并简单讲解 ADS 的发展和主要功能。

## 1.1 物联网综述

### 1.1.1 物联网的定义

#### 1. 概念

1999 年物联网的概念首次被提出，它打破了之前将物理基础设施和 IT 基础设施分开的传统思路，成为继计算机、互联网与移动通信网之后的世界信息产业第三次浪潮。目前对物联网没有明确定义，较为公认的说法是：物联网是把所有物品通过射频识别（RFID）、条码和二维码、全球定位系统和其他基于物物通信模式的短距无线网络等信息传感设备及系统与互联网连接起来，进行信息交换的网络，目的是让所有的物品都与网络连接在一起，系统可以对

物体进行识别、定位、追踪、监控、管理并触发相应事件。简而言之，物联网就是把生活中的各类物品和它们的属性标识连到互联网上（图 1.1），实现智能化识别和管理。

物联网是物物相连的互联网，如果说互联网实现了人与人之间的交流，那么物联网就将实现人与物体、物体与物体相互间的连接和交互，世界万物都可以通过这个平台联系，包括经济管理、生产运行、社会管理乃至个人生活，可以说它的诞生将创造一个物联网时代。

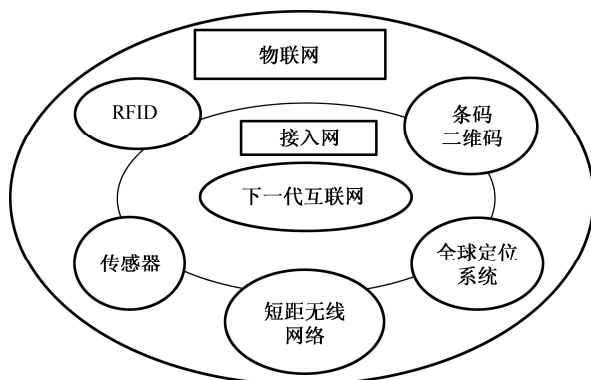


图 1.1 物联网概念模型

## 2. 基本特征

物联网的基本特征可概括如下。

**全面感知：**利用 RFID、传感器、二维码及其他各种感知设备随时随地采集各种动态对象信息，全面感知世界。

**可靠传输：**利用以太网、无线网、移动网将感知的信息进行实时的传递。

**智能控制：**对物体实现智能化的控制和管理，真正到达了人与物的沟通。

### 1.1.2 物联网与互联网的比较

首先，物联网是各种感知技术的广泛应用。物联网上部署了少量的多种类型传感器，每个传感器都是一个信息源，不同类别的传感器所捕获的信息内容和信息格式不同。传感器获得的数据具有实时性，按一定的频率周期性地采集信息，不断更新数据。

其次，它是一种建立在互联网上的泛在网络。物联网技术的重要基础和核心仍然是互联网，通过各种有线和无线网络与互联网融合，将物体的信息实时准确地传递出去。在物联网上的传感器定时采集的信息需要通过网络传输，由于其数量极其庞大，形成了海量信息，在传输过程中，为了保障数据的正确性和及时性，必须适应各种异构网络和协议。

再次，物联网不仅仅提供了传感器的连接，其本身也具有智能处理的能力，能够对物体实施智能控制。物联网将传感器和智能处理相结合，利用云计算、模式识别等各种智能技术，扩充其应用领域。从传感器获得的海量信息中分析、加工和处理出有意义的信息，以适应不同用户的需求。

物联网和互联网发展有一个最本质的不同点是两者发展的驱动力不同。互联网发展的驱动力是个人，因为互联网改变了人与人之间的交流方式，极大地激发了以个人为核心的创造力。而物联网概念下的服务平台的驱动力必须是来自政府和企业。物联网的实现首先需要改变的是企业的生产管理模式、物流管理模式、产品追溯机制和整体工作效率。实现物联网的

过程,其实是一个企业真正利用现代科技技术进行自我实现与创新的过程,这一阶段的主要工作是最大限度地把握需要感知的事物连接到管理平台,实际上是一个采集终端规模推广的过程。这个过程刚开始肯定会遇到阻力和困难,但只要坚定不移地去实践,一定会进入一个全新的世界。

### 1.1.3 物联网的体系架构

物联网是一种非常复杂、形式多样的系统技术应用。一般将物联网的主要技术体系按照三个层次建立模型。在这个技术体系中,物联网的技术构成主要体现在感知层、传输层和应用层3个层次上。

#### 1. 感知层

感知层 (Devices): 是指无处不在的物联网末端,数量在万亿以上,利用 RFID、摄像头、传感器、GPS 等技术识别物体、采集信息,是物联网系统的数据来源。

感知层是让物品说话的先决条件,主要用于采集物理世界中发生的物理事件和数据,包括各类物理量、身份标识、位置信息、音频、视频数据等。针对具体的感知任务,常采用协同处理的方式对多种类、多角度、多尺度的信息进行在线计算,并与网络中的其他单元共享资源进行交互与信息传输。感知层又分为数据采集与执行、短距离无线通信2个部分。数据采集与执行主要是运用智能传感器技术、身份识别以及其他信息采集技术,对物品进行基础信息采集,同时接收上层网络送来的控制信息,完成相应执行动作;短距离无线通信则完成小范围内的多个物品的信息集中与互通功能。

#### 2. 传输层

传输层 (Connect): 包括所有有线和无线、长距离和短距离、宽带和窄带通信系统,它利用移动通信系统和互联网将感知层获取的信息进行处理和传递,是物联网的基础设施。

传输层主要功能是对来自感知层的信息进行接入和传输,通过现有互联网或移动通信网 (TD-SCDMA、全球移动通信系统、无线局域网、无线接入网、卫星网等) 基础网络设施进行通信。为了更好地适应相对复杂的软件协议设计,传输层主要采用具有较强硬件支撑能力的异构网络接入设备,如接入互联网的网关、接入移动通信网的网关等。目前的接入设备多为传感网、公用通信网 (如无线互联网、有线互联网、TD-SCDMA 网、GSM 网) 和卫星网等。

#### 3. 应用层

应用层 (Application): 包括各种集成中间技术和应用层软件技术以及物联网门户系统,通过对感知层和传输层获取的信息进行分析和处理,作出正确的控制和决策,实现智能化的管理、应用和服务。

应用层的主要功能是对物品信息进行汇总、协同、共享、互通、分析和决策,相当于物联网的控制层、决策层。物联网的根本还是为人服务,为了更大程度地为人类服务,完成物品和人的交互,应用层将前面两层的信息收集起来,统一分析、决策,实现信息的综合利用。根据各行各业的特点,应用层分别提供相关内容的服务,如智能物流、智能医疗、智能交通、智能家居、智能电力等。

物联网各层次间既相对独立又紧密联系,三个层次相辅相成,缺一不可。针对某一具体应用,在进行系统设计时应兼顾各层功能,实现各层资源协同分配与共享。另外在同一个层

次上，也可以对选择的技术方案进行按需配置。总之，一个合理的设计方案应该能够为应用系统提供必要的整体性能保障。

#### 1.1.4 关键技术

在物联网应用中有三项关键技术：传感器技术，RFID 技术，嵌入式系统技术。

##### 1. 传感器技术

传感器技术就是把自然界中的各种物理量、化学量和生物量转化为可测量的电信号的装置与元件的技术。由信息采集层和网络层构成的信息感知体系是物联网应用推进的主要领域，而在其中起到关键推动作用的是无线传感器网络（WSN）。

传感器属于物联网的神经末梢，是人类全面感知自然的最核心元件。各类传感器的大规模部署和应用是构成物联网不可或缺的基本条件。对应不同的应用我们提供不同的传感器，覆盖包括智能工业、智能安保、智能家居、智能运输、智能医疗等各个行业。

##### 2. RFID 技术

RFID 技术即射频识别技术，是一种通信技术，它融合无线射频技术和嵌入式技术为一体，可通过无线电信号识别特定目标并读写相关数据，而无须识别系统与特定目标之间建立机械或光学接触。常用的有低频（125~134.2kHz）、高频（13.56MHz）、超高频（850~985 MHz）、微波（2.4~2.5GHz）等技术。RFID 读写器也分移动式的和固定式的，目前 RFID 技术应用很广，如图书馆、门禁系统、食品安全溯源等。其中 RFID 标签也是一种传感器技术。RFID 技术是融合了无线射频技术和嵌入式技术为一体的综合技术，在自动识别、物品物流管理有着广阔的应用前景。

##### 3. 嵌入式系统技术

嵌入式系统技术是综合了计算机软硬件、传感器技术、集成电路技术、电子应用技术为一体的复杂技术。经过几十年的演变，以嵌入式系统为特征的智能终端产品随处可见：小到人们身边的 MP3，大到航天航空的卫星系统。嵌入式系统正在改变着人们的生活，推动着工业生产以及国防工业的发展。如果把物联网用人体做一个简单比喻，传感器相当于人的眼睛、鼻子、皮肤等感官，网络就是神经系统用来传递信息，嵌入式系统则是人的大脑，在接收到信息后要进行分类处理。这个例子很形象地描述了传感器、嵌入式系统在物联网中的位置与作用。

#### 1.1.5 物联网应用

物联网应用十分广泛，遍及智能交通、环境保护、政府工作、公共安全、平安家居、智能消防、工业监测、环境监测、路灯照明管控、景观照明管控、楼宇照明管控、广场照明管控、老人护理、个人健康、花卉栽培、水系监测、食品溯源、敌情侦查和情报搜集等多个领域。

##### 1. 应用模式

根据其实际用途可以归结为以下三种基本应用模式。

###### （1）对象的智能标签

对象智能标签，通过 NFC、二维码、RFID 等技术标识特定的对象，用于区分对象个体，例如在生活中使用的各种智能卡，条码标签的基本用途就是用来获得对象的识别信息。此外

通过智能标签还可以用于获得对象物品所包含的扩展信息，例如智能卡上的金额余额，二维码中所包含的网址和名称等。

### (2) 环境监控和对象跟踪

环境监控和对象跟踪是利用多种类型的传感器和分布广泛的传感器网络，可以实现对某个对象的实时状态的获取和特定对象行为的监控，如使用分布在市区的各个噪声探头监测噪声污染，通过二氧化碳传感器监控大气中二氧化碳的浓度，通过 GPS 标签跟踪车辆位置，通过交通路口的摄像头捕捉实时交通流程等。

### (3) 对象的智能控制

物联网基于云计算平台和智能网络，可以依据传感器网络用获取的数据进行决策，改变对象的行为进行控制和反馈。例如，根据光线的强弱调整路灯的亮度，根据车辆的流量自动调整红绿灯间隔等。

## 2. 应用实例

在三种基本应用模式中，对象的智能标签，即 RFID 射频识别技术的应用最为广泛，从概念上来讲，RFID 类似于条码扫描，对于条码技术而言，它是将已编码的条形码附着于目标物并使用专用的扫描读写器利用光信号将信息由条形磁传送到扫描读写器；而 RFID 则使用专用的 RFID 读写器及专门的可附着于目标物的 RFID 标签，利用频率信号将信息由 RFID 标签传送至 RFID 读写器。

RFID 分为很多种，按频率主要分为超高、高、中、低 4 类。

(1) 低频 125kHz 主要用在门禁和停车场。

(2) 中频 13.56MHz 主要用在公交、考勤、门禁，如二代身份证。

门禁系统应用射频识别技术，可以实现持有效电子标签的车不停车，方便通行又节约时间，提高路口的通行效率，更重要的是可以对小区或停车场的车辆出入进行实时的监控，准确验证出入车辆和车主身份，维护区域治安，使小区或停车场的安防管理更加人性化、信息化、智能化、高效化。

(3) 高频 430~960MHz 主要用无源电子标签，在通信、物流、海关、展会进出证件、服装、企业资产管理、工业产品流动。

(4) 超高频 860M~2.4GHz 以上，主要用有源电子标签、电子收费系统、数据通信、区域管理。

ETC (Electronic Toll Collection)，即电子不停车收费系统，是指车辆在通过收费站时，通过车载设备实现车辆识别、信息写入（入口）并自动从预先绑定的 IC 卡或银行账户上扣除相应资金（出口）。电子不停车收费系统（ETC）是世界上最先进的收费系统，是智能交通系统的服务功能之一，过往车辆通过道口时无须停车，即能够实现车辆身份自动识别、自动收费。在车场管理中，为提高出入口车辆通行效率。

(5) 最近还有推出 5.8GHz，主要用于物流、资产管理。

## 1.2 射频电路基础

通信是物联网的关键，没有通信，物联网感知的大量信息就无法进行有效交换与共享，从而也就不能利用这些信息产生丰富的物联网应用，物联网通信包含有线和无线通信技术，而最能体现物联网特征的是无线通信技术，在无线通信技术中又离不开射频电路。

### 1.2.1 射频定义及应用

射频 (Radio Frequency), 即无线电频率, 广义地说就是可以向外辐射电磁信号的频率。实现无线电的发射、接收以及信息的加载和提取的电子线路称为射频电路。在电路设计中射频电路的频率较高、电路的尺寸可以与波长相比拟。射频电路应用的典型频段为几百 MHz 至几 GHz, 一般认为, 当频率高于 30MHz 时, 在电路的设计中就要考虑射频电路理论, 所以在这个频率范围内, 电路需要考虑波动特性和分布参数的影响, 低频的基尔霍夫电路理论不再适用。

频率范围为 300MHz~3000GHz 的电磁波被称为微波, 有分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波 4 个波段, 对应的波长为 1m~0.1mm。可以从频率划分看出, 微波的低频端与射频频率存在交叉, 目前没有明确定义出射频频率与微波频率的频率分界点。

在电子通信领域, 工作频率决定了信号采用的传输方式和信号的传输特性。根据不同的传输特性, 按照频率从低到高的次序, 将电磁频谱划分为不同的频段, 每一个频带有专门的用途。通常一个电路都是被设计成用于某个特定的频段, 对通信容量的要求越高, 使用的频率就越高。

频谱有许多划分方式, 表 1.1 列出了目前常用的频谱划分和使用情况。

表 1.1 IEEE 频谱

频 段	频 率	波 长
ELF (极低频)	30~300Hz	10000~1000km
VF (音频)	300~3000Hz	1000~100km
VLF (甚低频)	3~30kHz	100~10km
LF (低频)	30~300kHz	10~1km
MF (中频)	300~3000kHz	1~0.1km
HF (高频)	3~30MHz	100~10m
VHF (甚高频)	30~300MHz	10~1m
UHF (特高频)	300~3000MHz	100~10cm
SHF (超高频)	3~30GHz	10~1cm
EHF (极高频)	30~300GHz	1~0.1 cm
亚毫米波	300~3000GHz	1~0.1mm
P 波段	0.23~1GHz	130~30cm
L 波段	1~2GHz	30~15cm
S 波段	2~4GHz	15~7.5cm
C 波段	4~8GHz	7.5~3.75cm
X 波段	8~12.5GHz	3.75~2.4cm
Ku 波段	12.5~18GHz	2.4~1.67cm
K 波段	18~26.5GHz	1.67~1.13cm
Ka 波段	26.5~40GHz	1.13~0.75cm

由于下面各因素, 通信系统通常采用高频率信号来有效地传输信息。

(1) 工作频率越高, 带宽越大。当工作频率为 1GHz 时, 就会出现一些在低频下没有的现象。若传输的相对带宽为 10%时, 可以传输 100MHz 带宽的信号; 当工作频率为 1MHz 时, 若传输的相对带宽也为 10%, 只可以传输 0.1MHz 带宽的信号。通过比较可以看出, 高工作频率可以带来大带宽。

(2) 工作频率越高, 天线尺寸越小。无线通信需要采用天线来发射和接收信号, 如果天线的尺寸可以与波长相比拟的话, 天线的辐射更为有效。由于工作频率与波长成反比, 提高



工作频率可以降低波长,进而可以减小天线的尺寸。进一步地说,工作频率提高导致需要的天线尺寸减小,这迎合了现代通信对尺寸小型化的要求。

(3) 射频电路中电感和电容等元器件的尺寸较小,这使得射频设备的体积进一步减小。正是由于上述技术原因,越来越多的电子通信系统使用了射频频段,推动射频技术进一步发展。

随着科学技术不断进步,电子通信系统也不断地完善和发展。从有线传输的语音通信到无线传输的移动通信,从窄带语音通信到宽带综合业务通信,从模拟调制信号通信到数字调制通信信号,电子通信系统越来越先进,也越来越复杂。随着通信系统信息容量的不断提高,射频通信技术越来越体现其重要性。此外,目前几百 MHz 到几 GHz 频率的无线通信应用越来越多。全球移动通信系统(GSM)、全球定位系统(GPS)、无线局域网(WLAN)、第三代移动(3G)通信、第四代移动(4G)通信的主流标准都工作于 GHz,使得在此频率范围内的射频电路应用日趋广泛。对半导体器件和计算机来说,CPU 的工作频率已经达到 GHz,同样需要考虑在此频率下射频电路的设计问题。可以看出,射频技术在各个领域都具有重要作用。

## 1.2.2 传输线与史密斯圆图

### 1. 传输线

传输线理论是分布参数电路理论,它在场分析和基本电路理论之间架起了桥梁。随着工作频率的升高,波长不断减小,当波长可以与电路的几何尺寸相比拟时,传输线上的电压和电流将随空间位置而变化,使电压和电流呈现出波动性,这一点与低频电路完全不同。传输线理论用来分析传输线上电压和电流的分布,以及传输线上阻抗的变化规律。在射频频段,基尔霍夫定律不再适用,必须使用传输线理论取代低频电路理论。

#### 1) 传输线举例

传输线有特殊的结构。传输线有 TEM(横电磁波)传输线和 TE(横电波)、TM(横磁波)传输线(如波导),本书射频电路只涉及 TEM 传输线。TEM 传输线有许多种类,常用的有平行双导线、同轴线、带状线和微带线(传输准 TEM 波)。

#### 2) 传输线等效电路表示

电路理论与传输线理论的区别,主要在于电路尺寸与波长的关系。传输线属长线,沿线各点的电压和电流(或电场和磁场)既随时间变化,又随空间位置变化,是时间和空间的函数,传输线上电压和电流呈现出了波动性,所以长线用传输线理论来分析。

传输线上各点的电压和电流(或电场和磁场)不相同,可以从传输线的等效电路得到解释,这就是传输线的分布参数概念。分布参数是相对于集总参数而言的。在低频电路中,认为电场能量集中在电容器中,磁场能量集中在电感器中,电磁能的消耗全部集中在电阻元件上,连接元件的导线是既无电感、电容,又无电阻、电导的理想导线,这就是集总参数的概念。传输线理论是分布参数电路理论,认为分布电阻、分布电感、分布电容和分布电导这 4 个分布参数存在于传输线的所有位置上。当频率增高到射频,连接元件的传输线由于集肤效应的出现,使传输线的有效面积减小,传输线上的电阻增加,且分布在传输线上,可称为传输线的分布电阻;传输线上有高频电流流过,传输线周围就必然有高频磁场存在,沿线就存在电感,可称为传输线的分布电感;又因传输线两导体间有电压,故两导体间存在高频电场,沿线就分布着电容,可称为传输线的分布电容;传输线两导体间有漏电,沿线两导体间就存在着漏电导,可称为传输线的分布电导。

随着频率的增高，分布参数引起的阻抗效应增大，不能再忽略了，分布参数是高频条件下的必然结果，必须加以考虑。传输线的等效电路如图 1.2 所示，其中图 1.2(a)为一段  $dz$  长传输线的等效电路，图 1.2(b)为一条传输线的等效电路。

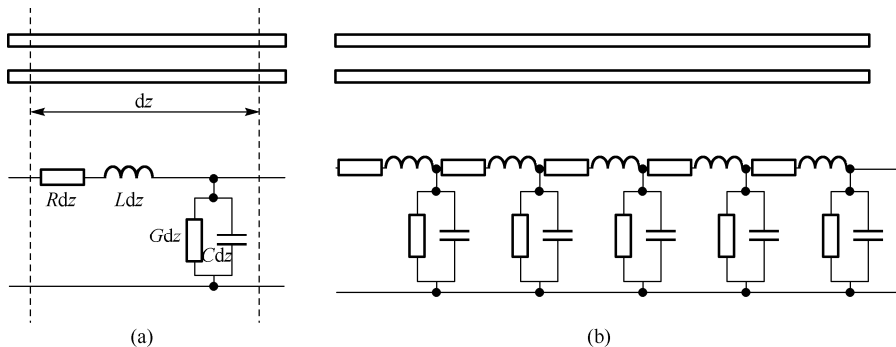


图 1.2 传输线的等效电路

### 3) 传输线方程及其解

传输线方程是研究传输线上电压、电流的变化规律以及它们之间相互关系的方程。对于均匀传输线，线元  $dz$  可以看成集总参数电路，线元  $dz$  上的电压和电流满足如下关系。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} &= - \left[ Ri(z,t) + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} \right] \\ \frac{\partial i(z,t)}{\partial z} &= - \left[ Gv(z,t) + C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

式 (1.1) 称为均匀传输线方程。

通常传输线的始端接入角频率为  $\omega$  的正弦信号源，此时传输线上电压和电流的瞬时值  $v(z,t)$  和  $i(z,t)$  可以表示为：

$$\left. \begin{aligned} v(z,t) &= \text{Re}[V(z)e^{j\omega t}] \\ i(z,t) &= \text{Re}[I(z)e^{j\omega t}] \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

于是得到如下传输线方程：

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dV}{dz} &= (R + j\omega L)I \\ -\frac{dI}{dz} &= (G + j\omega C)V \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

式中， $Z = (R + j\omega L)$  为传输线单位长度的串联阻抗， $Y = (G + j\omega C)$  为传输线单位长度的并联导纳。

在式 (1.3) 两边对  $z$  再微分一次，可以得到：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 V}{dz^2} - \gamma^2 V &= 0 \\ \frac{d^2 I}{dz^2} - \gamma^2 I &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

其中：

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (1.5)$$

式(1.4)称为均匀传输线的波动方程。 $\gamma$ 称为传输线上波的传播常数(Propagation Constant),一般情况下 $\gamma$ 为复数,其实部 $\alpha$ 称为衰减常数(Attenuation Constant),虚部 $\beta$ 称为相移常数(Phase Constant)。

式(1.4)的解为:

$$\left. \begin{aligned} V(z) &= A_1 e^{-\gamma z} + A_2 e^{\gamma z} \\ I(z) &= \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma z} - A_2 e^{\gamma z}) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

其中:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.7)$$

实际中,常假定传输线为无耗传输线,于是有:

$$\alpha = 0, \gamma = j\beta \quad (1.8)$$

$$\left. \begin{aligned} V(z) &= A_1 e^{-j\beta z} + A_2 e^{j\beta z} \\ I(z) &= \frac{1}{Z_0} (A_1 e^{-j\beta z} - A_2 e^{j\beta z}) \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

式(1.9)给出了均匀无耗传输线上电压和电流的分布。

#### 4) 基本特性参数

传输线的基本特性参数包括传输线的特性阻抗、反射系数、驻波系数和行波系数、输入阻抗、传播常数、衰减常数和传输功率等,下面对上述参数分别加以介绍。

##### (1) 特性阻抗

传输线上入射电压与入射电流之比(也即行波电压与行波电流之比),称为传输线的特性阻抗,特性阻抗用 $Z_0$ 表示。传输线特性阻抗的一般公式为:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

对于射频传输线,特性阻抗近似为:

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{R}{C}} \quad (1.10)$$

在射频情况下可以认为传输线的特性阻抗为纯电阻。

平行双导线的特性阻抗为:

$$Z_0 = 120 \ln \left[ \frac{D}{d} + \sqrt{\left( \frac{D}{d} \right)^2 - 1} \right] \approx 120 \ln \frac{2D}{d} (\Omega) \approx 276 \lg \frac{2D}{d} (\Omega) \quad (1.11)$$

同轴线的特性阻抗为:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} (\Omega) \approx \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{b}{a} (\Omega) \quad (1.12)$$

式中,  $\epsilon_r$  为同轴线两导体间介质的相对介电常数。

##### (2) 反射系数

传输线上的波一般为入射波与反射波的叠加。波的反射现象是传输线上最基本的物理现象,传输线的工作状态也主要决定于反射的情况。为了表示传输线的反射特性,引入反射系

数  $\Gamma$ 。反射系数是指传输线上某点的反射电压与入射电压之比，也等于传输线上某点反射电流与入射电流之比的负值。反射系数  $\Gamma$  为：

$$\Gamma(z') = \frac{V^-(z')}{V^+(z')} = -\frac{I^-(z')}{I^+(z')} \quad (1.13)$$

式中， $V^+(z')$  和  $V^-(z')$  为  $z'$  处的入射电压和反射电压， $I^+(z')$  和  $I^-(z')$  为  $z'$  处的入射电流和反射电流，如图 1.3 所示。

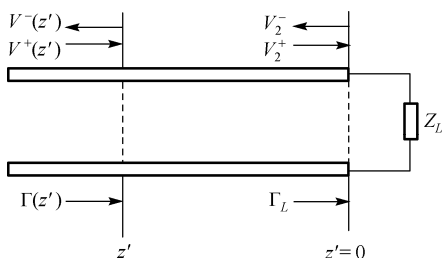


图 1.3 传输线上的入射电压、反射电压和反射系数

反射系数还可以表示为：

$$\Gamma(z') = \Gamma_L e^{-j2\beta z'} = |\Gamma_L| e^{j(\phi_L - 2\beta z')} \quad (1.14)$$

其中  $\Gamma_L$  为终端反射系数。

$$\Gamma_L = \frac{V_2 - I_2 Z_0}{V_2 + I_2 Z_0} = |\Gamma_L| e^{j\phi_L} \quad (1.15)$$

综上所述，可以得到如下结论：

- ① 反射系数  $\Gamma(z')$  随传输线位置变化。
- ② 反射系数  $\Gamma(z')$  为复数，这反映出反射波与入射波之间有相位差异。

③ 无耗传输线上任一点反射系数的模值是相同的，说明无耗传输线上任一点反射波与入射波振幅之比为常数。

④ 反射系数  $\Gamma(z')$  是周期性函数，周期为  $\lambda/2$ 。

⑤ 当  $Z_L = Z_0$  时，反射系数  $\Gamma_L = 0$ ，传输线上无反射波，只有入射波，称为行波状态。

⑥ 当  $Z_L = 0$ （终端短路）时，反射系数  $\Gamma_L = -1$ ；当  $Z_L = \infty$ （终端开路）时，反射系数  $\Gamma_L = 1$ ；当  $Z_L = \pm jX_L$ （终端接纯电抗负载）时，反射系数  $|\Gamma_L| = 1$ ，这三种情况下入射波和反射波的振幅相等，存在相位差异，称为驻波状态。

⑦ 当  $Z_L = R_L \pm jX_L$  时，反射系数  $0 < |\Gamma_L| < 1$ ，称为部分反射工作状态，为行驻波状态。

### （3）驻波系数和行波系数

由上面的结果可以看出，反射系数是复数，且随传输线的位置而改变。为更方便地表示传输线的反射特性，工程上引入驻波系数的概念。

驻波系数定义为传输线上电压最大点与电压最小点的电压振幅之比，用 VSWR 或  $\rho$  表示。驻波系数也称为电压驻波比。

$$\text{VSWR(或}\rho) = \frac{|V_{\max}|}{|V_{\min}|} \quad (1.16)$$

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (1.17)$$

电压驻波比的倒数为行波系数，用  $K$  表示。

$$K = \frac{1}{\rho} = \frac{|V_{\min}|}{|V_{\max}|} \quad (1.18)$$

$$K = \frac{1 - |\Gamma_L|}{1 + |\Gamma_L|} \quad (1.19)$$

可以得到如下结论。

- ① 当  $|\Gamma_L| = 0$ ，也即行波状态时，驻波系数  $\rho = 1$ ，行波系数  $K = 1$ 。

② 当  $|\Gamma_L|=1$ ，也即驻波状态时，驻波系数  $\rho=\infty$ ，行波系数  $K=0$ 。

③ 当  $0 < |\Gamma_L| < 1$ ，也即行驻波状态时，驻波比  $1 < \rho < \infty$ ，行波系数  $0 < K < 1$ 。

(4) 电压和电流的最大值和最小值

传输线上电压的振幅为最大值时，电流的振幅为最小值，分别为：

$$\left. \begin{aligned} |V_{\max}| &= |V_2^+| (1 + |\Gamma_L|) \\ |I_{\min}| &= |I_2^+| (1 - |\Gamma_L|) \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

传输线上电压的振幅为最小值时，电流的振幅为最大值，分别为：

$$\left. \begin{aligned} |V_{\min}| &= |V_2^+| (1 - |\Gamma_L|) \\ |I_{\max}| &= |I_2^+| (1 + |\Gamma_L|) \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

即传输线上电压最小值所在点，电流为最大值；传输线上电压最大值所在点，电流为最小值。

(5) 输入阻抗

传输线上任意一点电压  $V(z)$  与电流  $I(z)$  之比称为传输线的输入阻抗。输入阻抗为：

$$Z_{\text{in}}(z) = \frac{V(z)}{I(z)} \quad (1.22)$$

输入阻抗还可以表示为：

$$Z_{\text{in}}(z') = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta z'}{Z_0 + jZ_L \tan \beta z'} \quad (1.23)$$

式中， $Z_L$  为传输线的负载阻抗。

传输线的负载阻抗  $Z_L$  是指传输线负载端的阻抗，即负载端的电压与电流之比。传输线上任一点的阻抗是由该点向负载看进去的阻抗，也即输入阻抗  $Z_{\text{in}}(z')$ ，如图 1.4 所示。

传输线的输入阻抗有如下结论。

① 当负载  $Z_L = Z_0$  时，输入阻抗  $Z_{\text{in}}(z') = Z_0$ 。

这是负载匹配的情况，负载匹配时传输线上所有点的输入阻抗都等于特性阻抗  $Z_0$ 。

② 当负载  $Z_L \neq Z_0$  时，输入阻抗  $Z_{\text{in}}(z')$  随传输线的位置  $z'$  而变，输入阻抗  $Z_{\text{in}}(z')$  与负载阻抗  $Z_L$  不相等。

③ 输入阻抗  $Z_{\text{in}}(z')$  是周期性函数，周期为  $\lambda/2$ 。

(6) 传播常数

传播常数  $\gamma$  是描述传输线上入射波和反射波的衰减和相位变化的参数，传播常数的一般公式为：

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (1.24)$$

式中， $\gamma$  一般是频率的复杂函数，应用不太方便。对于无耗和射频低耗情况，其表示式可以大为简化。对于射频低耗传输线：

$$\alpha = \frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2}, \beta = \omega\sqrt{LC} \quad (1.25)$$

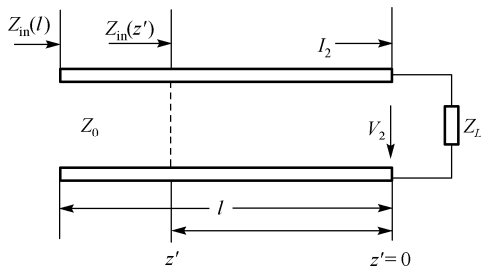


图 1.4 传输线上的输入阻抗

## (7) 衰减常数

衰减常数表示单位长度行波振幅的变化, 常用分贝 (dB) 和奈培 (NP) 这两个单位表示, 下面分别加以介绍。

① 分贝 (dB)。若传输线有衰减, 可以将传输线上两点功率电平  $P_1$  和  $P_2$  的比值用分贝 (dB) 来表示:

$$10\lg(P_1/P_2) = 20\lg(V_1/V_2) \quad (1.26)$$

② 奈培 (NP)。传输线中的衰减也常用奈培 (NP) 来表示:

$$\frac{1}{2} \ln \frac{P_1}{P_2} = \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (1.27)$$

分贝与奈培的关系为:

$$1 \text{ 奈培 (NP)} = 8.686 \text{ 分贝 (dB)}$$

$$1 \text{ 分贝 (dB)} = 0.115 \text{ 奈培 (NP)}$$

由上面的式 (1.26) 计算出的分贝数和式 (1.27) 计算出的奈培数, 只能表示传输线上两点之间的相对电平, 由分贝引伸出来的如下两个基本单位, 可以用于确定传输电路中某点的绝对电平。

③ dBm (分贝毫瓦)。分贝毫瓦 (dBm) 的定义是功率电平对 1 毫瓦的比, 即:

$$\text{功率(dBm)} = 10\lg \frac{P(z)}{1\text{mW}} \quad (1.28)$$

$$0\text{dBm} = 1\text{mW}$$

④ dBW (分贝瓦)。分贝瓦 (dBW) 的定义是功率电平对 1 瓦的比, 即:

$$\text{功率(dBW)} = 10\lg \frac{P(z)}{1\text{W}} \quad (1.29)$$

分贝毫瓦 (dBm) 与分贝瓦 (dBW) 的关系为:

$$30\text{dBm} = 0\text{dBW}$$

## (8) 相移常数、相速度和波长

相移常数表示单位长度行波相位的变化。

行波的相速度为:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.30)$$

式中,  $c$  为光速, 这表明传输线上波的速度与同介质中波的速度相同。

同一时刻相位相差  $2\pi$  的两点之间的距离为波长, 以  $\lambda$  表示, 于是有:

$$\omega t_1 - \beta(z_1 + \lambda) = \omega t_1 - \beta z_1 - 2\pi$$

由此可得:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (1.31)$$

## (9) 传输功率

传输线的传输功率为:

$$P(z') = \frac{1}{2} \text{Re}[V(z')I^*(z')] = \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \frac{|V^+(z')|^2}{Z_0} [1 - |\Gamma(z')|^2] + \Gamma(z') - \Gamma^*(z') \right\} \quad (1.32)$$

式中,  $\Gamma(z') - \Gamma^*(z')$  为虚数, 因此式 (1.32) 可以写成:

$$P(z') = \frac{|V^+(z')|^2}{2Z_0} [1 - |\Gamma(z')|^2] = P^+(z') - P^-(z') \quad (1.33)$$

式中,  $P^+(z')$  和  $P^-(z')$  分别表示通过  $z'$  点处的入射波功率和反射波功率, 这表明无耗传输线上通过任意点的传输功率等于该点的入射波功率与反射波功率之差。

对于无耗线, 通过线上任意点的传输功率都是相同的, 为简便起见, 在电压波腹点 (即电流波谷点) 处计算传输功率, 传输功率为:

$$P(z') = \frac{1}{2} |V|_{\max} |I|_{\min} = \frac{1}{2} \frac{|V|_{\max}^2}{Z_0} K \quad (1.34)$$

可见传输线的功率容量与行波系数有关,  $K$  越大, 功率容量就越大。

### 5) 微带线

微带 (Microstrip) 已经成为射频和微波频率传输线的一种普遍形式。微带线是平面型结构, 可以用蚀刻电路技术在 PCB 上制作, 容易外接固体射频器件构成各种射频有源电路, 而且可以在一块介质基片上制作完整的电路, 实现射频部件和系统的集成化、固态化和小型化。

#### (1) 微带线的有效介电常数和特性阻抗

图 1.5 所示的微带线是由地平面上厚度为  $h$  的介质上宽度为  $w$  导体线构成的。

微带线导体带上面为空气, 导体带下面为介质, 可以定义一种全部填充等效介质的微带线, 等效介质的相对介电常数为  $F$ , 这种等效的微带线和真实微带线具有相同的速度和特性阻抗, 其等效关系由有效相对介电常数  $\epsilon_{re}$  决定,  $\epsilon_{re}$  在  $1 < \epsilon_{re} < \epsilon_r$  范围内。

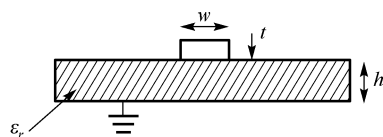


图 1.5 微带传输线

微带线有效相对介电常数的近似计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{re} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \left( 2 + \frac{12h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.041 \left( 1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right] & w \leq h \\ \epsilon_{re} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} & w \geq h \end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

式中,  $w$  表示导体带宽度,  $h$  表示介质基片厚度。

利用微带线有效相对介电常数, 可以得到微带线特性阻抗  $Z_0$  的近似计算公式:

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) & w \leq h \\ Z_0 &= \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}} \left[ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1.444 \right) \right]} & w \geq h \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

在给定微带线的特性阻抗  $Z_0$  和相对介电常数  $\epsilon_r$  后, 也可以求出  $w/h$  的值。  $w/h$  值的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{w}{h} &= \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \frac{w}{h} \leq 2 \\ \frac{w}{h} &= \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} & \frac{w}{h} \geq 2 \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

式中:

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r} \right), B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}}$$

### (2) 微带线的传输特性

微带线不是严格的 TEM 型传输线, 它存在一定程度的频率分散。除非是在非常宽的频率范围内使用, 一般情况下 TEM 近似已经足够了, 故微带线的传输特性近似按照 TEM 模计算。

微带线的相速度和波长按下面公式计算:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{re}}}, \lambda_p = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} \quad (1.38)$$

### (3) 微带线的损耗与衰减

微带线存在损耗。微带线除了导体损耗和介质损耗外, 还有辐射损耗, 微带线的损耗可以用衰减常数来表示。如果忽略辐射损耗, 则微带线的衰减常数为:

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c \quad (1.39)$$

式中,  $\alpha_d$  由微带线介质损耗引起,  $\alpha_c$  由微带线导体损耗引起。

微带线的介质损耗是由介质的漏电导致的。对于低损耗介质, 微带线的介质损耗为:

$$\alpha_d = 27.3 \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1} \frac{\varepsilon_{re} - 1}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} \frac{\tan \delta}{\lambda_0} \text{ (dB/cm)} \quad (1.40)$$

式中,  $\tan \delta$  为损耗角正切。对于高损耗介质, 微带线的介质损耗为:

$$\alpha_d = 4.34 \sigma \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{1}{\varepsilon_r - 1} \frac{\varepsilon_{re} - 1}{\sqrt{\varepsilon_{re}}} \text{ (dB/cm)} \quad (1.41)$$

微带线的导体损耗为:

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 w} \quad (1.42)$$

其中:

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}} \quad (1.43)$$

式中,  $\sigma$  为导体的电导率。

## 2. 史密斯圆图

在传输线上某一点的归一化阻抗与反射系数的关系为:

$$\bar{Z} = \bar{R} + j\bar{X} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = \frac{1 + \Gamma_r + j\Gamma_i}{1 - \Gamma_r - j\Gamma_i} \quad (1.44)$$

此处,  $\Gamma_r$  和  $\Gamma_i$  分别代表反射系数的实部和虚部, 而  $\bar{R}$  和  $\bar{X}$  分别为归一化阻抗的实部和虚部。分别使方程两边的实部和虚部相等, 就可使这个复数方程分解为两个方程, 即:

$$\left( \Gamma_r - \frac{\bar{R}}{1 + \bar{R}} \right)^2 + \Gamma_i^2 = \left( \frac{1}{1 + \bar{R}} \right)^2 \quad (1.45)$$

及

$$(\Gamma_r - 1)^2 + \left( \Gamma_i - \frac{1}{\bar{X}} \right)^2 = \left( \frac{1}{\bar{X}} \right)^2 \quad (1.46)$$



这两个方程代表了在复数 $\Gamma$ 平面上的一族圆。式(1.45)对应的圆的中心坐标为 $\left(\frac{\bar{R}}{1+\bar{R}}, 0\right)$ ，半径为 $1/(1+\bar{R})$ 。当 $\bar{R}=0$ 时，对应的是圆心坐标为原点、半径为1的圆。随着 $\bar{R}$ 的增加，电阻为常数对应的圆的圆心沿正实轴移动，而圆的半径逐渐减小。当 $\bar{R}=\infty$ 时，圆的半径减为零，同时圆心移到 $(1,0)$ 处，如图1.6所示。注意，这是正阻抗（即 $0 \leq \bar{R} \leq \infty$ 和 $-\infty \leq \bar{X} \leq +\infty$ ）的情况。

同样，式(1.46)表示圆心为 $\left(1, \frac{1}{\bar{X}}\right)$ 、半径为 $\frac{1}{\bar{X}}$ 的圆。当 $\bar{X}=0$ 时，圆的中心在 $(1, \infty)$ 处，半径为无穷大，因此，它就是沿 $\Gamma_r$ 轴的一条直线。当 $\bar{X}$ 在正方向（也就是说， $0 \leq \bar{X} \leq +\infty$ ）增加时，圆心沿着由 $\Gamma_r=1$ 的垂直线逐渐向 $(1,0)$ 点移动，其半径也随之变得越来越小。当 $\bar{X}=\infty$ 时，对应的圆就缩小为一个位于 $(1,0)$ 的点。对于 $0 \geq \bar{X} \geq -\infty$ 的情况，可以观察到类似的特性。这两个方程的所有可能的归一化电阻和电抗值如图1.6所示，这种图形表示法称为Smith圆图（Smith chart）。因此，在Smith圆图上，一个归一化阻抗点代表了在复数平面上以极坐标表示的相应的反射系数。无耗传输线上的反射系数的幅值保持常数 $\rho_L$ ，而它的相角以 $-2\beta l$ 方式减少，因此它代表一个半径为 $\rho_L$ 的圆。如果由负载向信号源的方向移动，反射系数对应的点将在圆上沿顺时针方向移动。由于反射系数每隔半波长就发生周期性的重复，所以圆的周长等于 $\lambda/2$ 。对于一个给定的反射系数，利用Smith圆图的阻抗标尺可以求得归一化阻抗。进一步地说，在式(1.44)中，对 $\Gamma_r > 0$ 和 $\Gamma_i = 0$ 的情况， $\bar{R}$ 等于VSWR；另外，当 $\Gamma_r < 0$ 及 $\Gamma_i = 0$ 时，它等于VSWR的倒数。因此，在 $\Gamma_r$ 的正轴上， $\Gamma_r$ 的值也代表VSWR的值。

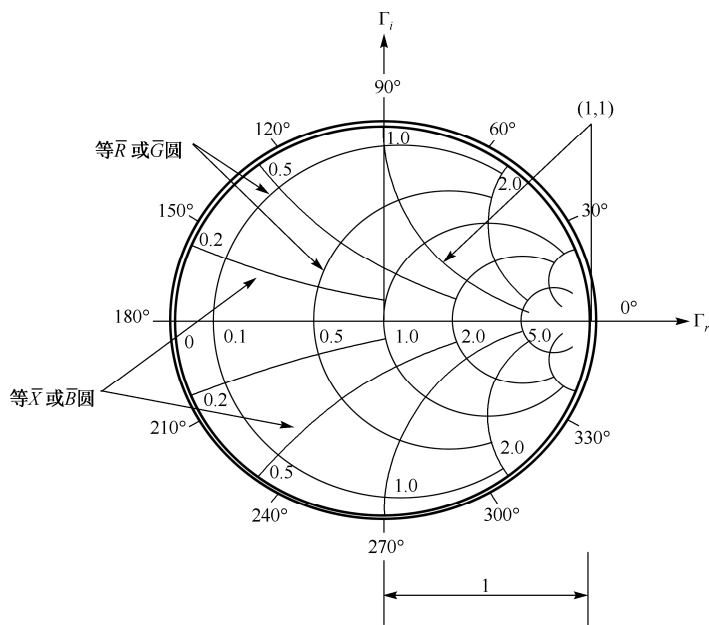


图1.6 史密斯圆图

由于导纳是阻抗的倒数，所以可以表示为：

$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \quad (1.47)$$

因此，类似的分析可以用归一化导纳来代替阻抗进行。可以得到相同类型的圆图，只是

要用归一化的电导圆来代替归一化的电阻圆。同样，可用归一化的电纳圆弧代替归一化的电抗圆弧。

每一个圆对应的归一化的电阻（或电导）被标记在 Smith 圆图的轴上。归一化的正电抗（或电纳）圆弧线显示在圆图的上半部分，而负的电抗（或电纳）则显示在图的下半部分。Smith 圆图可以用于传输电路的设计和分析。

### 1.2.3 射频网络分析基础

分析射频电路工作特性的方法有两个，一个是应用波动方程和特定的边界条件，求出其场（或电压和电流）的分布；另一个是把射频电路等效为网络，把连接网络的传输线等效成双导线，用网络的方法进行分析。第一种方法比较严格，但其数学运算烦琐，不便于工程应用；第二种方法避开了射频电路的复杂分析，能够得到射频电路的主要传输特性，并且网络参量可以用测量的方法来确定，便于工程应用。虽然网络方法不能得到射频电路内部场的分布情况，但由于网络方法计算简便，易于测量，又为广大工程技术人员所熟知，故应用较为广泛。

网络方法是从一个特殊的视角去分析电路，其最重要的是不必了解系统内部的结构，将系统看成了一个“黑盒子”，我们只需研究“黑盒子”的输入和输出参数。射频的这种“黑盒子”方法主要用于分析电路的整体功能而不关注电路元件的组成和复杂特性，可以使设计人员快速掌握射频系统的传输特性，并使设计最优化。因此，这种“黑盒子”的网络方法得到了射频工程设计人员的广泛欢迎。

每个射频网络都可能和几个传输线相连接。按照所连接传输线数目的多少，网络可以分成单端口网络、双端口网络、三端口网络及四端口网络等。实际使用的射频网络可高达四端口，但四端口以上的网络就很少应用了。

#### 1. 二端口低频网络参量

对一个线性网络特征的描述，可以采用网络参量的形式给出。描述低频线性网络输入和输出的物理量是电压和电流，低频网络的网络参量通过电压和电流的关系给出。二端口网络



图 1.7 二端口网络的电压和电流

电压和电流的基本规定如图 1.7 所示，图中标明了电压和电流的极性和方向。

常用的低频网络参量有 4 种，分别称为阻抗参量、导纳参量、混合参量和转移参量，视具体应用场合，可选择一种最适合电路特性的网络参量。

##### (1) 阻抗参量

用二端口网络两个端口上的电流表示两个端口上的电压，网络方程为：

$$\begin{cases} v_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 \\ v_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 \end{cases}$$

或写成：

$$[V] = [Z][I] \quad (1.48)$$

式中：

$$[V] = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad [I] = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad [Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

其中  $[Z]$  称为阻抗参量或阻抗矩阵。

## (2) 导纳参量

用二端口网络两个端口上的电压表示两个端口上的电流，网络方程为：

$$\begin{cases} i_1 = Y_{11}v_1 + Y_{12}v_2 \\ i_2 = Y_{21}v_1 + Y_{22}v_2 \end{cases}$$

或写成：

$$[I] = [Y][V] \quad (1.49)$$

式中：

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (1.50)$$

式中， $[Y]$ 称为导纳参量或导纳矩阵。

## (3) 转移参量

用端口 2 的电压和电流表示端口 1 的电压和电流，且规定进入网络的方向为电流正方向，网络方程为：

$$\begin{cases} v_1 = Av_2 - Bi_2 \\ i_1 = Cv_2 - Di_2 \end{cases}$$

或写成：

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{bmatrix}$$

令：

$$[ABCD] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (1.51)$$

$[ABCD]$ 称为转移参量或转移矩阵，也称为矩阵。

## 2. 二端口射频网络参量

在射频频段，用散射参量 $[S]$ 描述网络的网络参量。 $[S]$ 参量可以表征射频器件的特征，在绝大多数涉及射频系统的技术资料和设计手册中，网络参数都是由 $[S]$ 参量表示的。

对于级联网络，射频电路可以利用传输 $[T]$ 参量简化对网络的分析。下面介绍 $[S]$ 参量和 $[T]$ 参量这两种射频网络参量。

## (1) 散射参量

在射频频段内，网络端口与外界连接的是各类传输线，端口上的参量由入射波和反射波叠加而成，散射参量采用入射行波和反射行波的归一化电压来表征各网络端口的相互关系，如图 1.8 所示。

对于二端口网络，端口 1 的归一化入射电压和归一化反射电压定义为：

$$a_1 = \frac{V_1^+}{\sqrt{Z_{01}}} \quad (1.52)$$

$$b_1 = \frac{V_1^-}{\sqrt{Z_{01}}} \quad (1.53)$$



图 1.8 归一化入射电压和归一化反射电压的定义

端口 2 的归一化入射电压和归一化反射电压定义为：

$$a_2 = \frac{V_2^+}{\sqrt{Z_{02}}} \quad (1.54)$$

$$b_2 = \frac{V_2^-}{\sqrt{Z_{02}}} \quad (1.55)$$

二端口网络中，归一化入射电压和归一化反射电压的关系用方程表示为：

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad (1.56)$$

将上式写成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1.57)$$

上式可以简写成：

$$[b] = [S][a] \quad (1.58)$$

式中， $[S]$  称为散射矩阵或散射参量。

$S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{21}$  和  $S_{22}$  为散射参量，这些参量的定义如下。

$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$ ：表示端口 2 接匹配负载时端口 1 的电压反射系数。

$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0}$ ：表示端口 1 接匹配负载时端口 2 至端口 1 的反向电压传输系数。

$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$ ：表示端口 2 接匹配负载时端口 1 至端口 2 的正向电压传输系数。

$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}$ ：表示端口 1 接匹配负载时端口 2 上的电压反射系数。

## 2. 传输参量

用  $T_2$  参考面上的归一化电压入射波和归一化电压反射波表示  $T_1$  参考面上的归一化电压入射波和归一化电压反射波，网络方程为：

$$\begin{cases} a_1 = T_{11}b_2 + T_{12}a_2 \\ b_1 = T_{21}b_2 + T_{22}a_2 \end{cases} \quad (1.59)$$

令：

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

$[T]$  称为传输参量或传输矩阵。

## 3. 网络参量之间的互换

前面讨论的低频网络参量和射频网络参量，可以用来表征同一网络，因此不同的网络参量可以相互转换。在网络的分析与综合中，常用到不同网络参量之间的转换，关于网络参量之间的转换公式，可以参阅文献 2。

在 ADS 软件中, 对同一网络常用不同的网络参量来表示, 如在  $S$  参数仿真时, 一个网络可以同时给出  $[Z]$  参量、 $[Y]$  参量和  $[S]$  参量。

#### 4. 多端口射频网络参量

在射频电路中, 经常用到多端口网络, 本节讨论多端口网络的散射参量。设多端口网络各端口参考面上的归一化入射波电压为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\dots$ 、 $a_n$ , 归一化反射波电压为  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $\dots$ 、 $b_n$ , 应用叠加定理可以写出多端口网络归一化入射波电压和归一化反射波电压间关系的线性方程。

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + \dots + S_{1n}a_n \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + \dots + S_{2n}a_n \\ &\dots \\ b_n &= S_{n1}a_1 + S_{n2}a_2 + \dots + S_{nn}a_n \end{aligned} \right\} \quad (1.61)$$

上式写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1.62)$$

或简写成:

$$[b] = [S][a] \quad (1.63)$$

式中,  $[S]$  为多端口网络的散射参量或散射矩阵。

由式 (1.63), 可以得到多端口网络散射参量的物理意义如下。

$S_{ii}$ : 其他端口都匹配时端口  $i$  的电压反射系数。

$S_{ij}$ : 其他端口都匹配时端口  $j$  到端口  $i$  的电压传输系数。

#### 习题

1. 什么是物联网? 简述物联网的发展历程?
2. 射频电路的特点是什么? 举出射频通信系统的一个实例说明射频电路的应用?
3. 举例说明射频电路在物联网通信中的应用?

## 第2章 ADS 2012 简介

本章以 Advanced Schematic System 2012 版本为例介绍 ADS 的四种工作视窗：主视窗、原理图视窗、布局图视窗和数据显示视窗。各视窗之间可以相互转换，启动 ADS 之后，首先自动弹出的是主视窗，可以由主视窗进入原理图视窗、布局图视窗和数据显示视窗，也可以通过原理图视窗进入布局图视窗和数据显示视窗。下面分别讲解启动和退出 ADS 的方法及四种视窗的构成和功能。

### 2.1 ADS 概述

ADS 全称 Advanced Schematic System，它支持时域电路设计、频域电路设计、电路布局图设计和通信系统设计等所有类型的射频电路设计，同时提供各种电路的时域仿真分析、频域仿真分析和电磁仿真分析，小到单独元器件的仿真，大到系统仿真、数/模混合仿真，并可以与其他 EDA 软件进行连接。Agilent 公司利用自身的优势，在软件与测试仪器的结合上有着其他软件无法比拟的优势，极大地提高了设计的效率。其强大功能和较高的准确性，已经得到业界的普遍认可，成为业内最为流行的射频 EDA 软件。

#### 2.1.1 ADS 的仿真分析方法

ADS 软件可以帮助电路设计者进行模拟、射频与微波等电路和通信系统设计，其提供的仿真分析方法大致可以分为时域仿真、频域仿真、系统仿真和电磁仿真，包括直流仿真、交流仿真、S 参数仿真、谐波平衡仿真、增益压缩仿真、电路包络仿真、瞬态仿真、预算仿真和电磁仿真等，这些仿真可以进行线性和非线性仿真，电路和系统仿真，频域、时域和电磁仿真。

##### 1. 高频 SPICE 瞬态分析与卷积分析

高频 SPICE 瞬态分析是一种时域的仿真分析方法，可分析线性与非线性电路的瞬态效应，还能提供如 SPICE 仿真器相同的瞬态分析。但是与传统 SPICE 仿真软件相比，它又有很多优点。例如，在 ADS 的 SPICE 高频仿真器中可以直接使用频域分析模型实现对微带线和分布参数滤波器的分析，而在 SPICE 仿真器中无法直接使用频域分析模型。因为 ADS 在仿真时可以将频域分析模型进行拉氏变换后再进行瞬态分析，而不需要使用者将该模型转化为等效的 RLC 电路，因此 SPICE 高频仿真器除了可以做低频电路的瞬态分析，也可以分析高频电路的瞬态响应。

卷积分析方法是一种高级时域分析方法，它架构在 SPICE 高频仿真器上，可以更加准确地用时域的方法分析与频率相关的元件，例如，以 S 参数定义的元件、传输线和微带线等。

##### 2. 线性分析

线性分析是频域、小信号电路的仿真分析方法，可以对线性和非线性射频电路进行线性分析。在进行线性分析时，软件首先会先针对电路中每个元件计算所需的线性参数，如 S、Z、

Y 和 H 参数、反射系数、稳定系数、电路阻抗、噪声、增益与损耗等，然后对整个电路进行分析和仿真。

### 3. 谐波平衡分析

谐波平衡分析提供频域、大信号、非线性、稳态电路的仿真分析方法，可以用来分析具有多频输入信号的非线性电路并得到非线性的电路响应，如谐波失真、功率压缩点、三阶交调点、非线性噪声等参数。谐波平衡仿真是一个有效的频域分析工具，与时域瞬态 SPICE 仿真分析相比，它可以给非线性电路提供一个比较快速有效的分析方法，能有效地填补时域瞬态 SPICE 仿真和小信号 S 参数仿真的不足。对现今包含混频电路结构的高频通信系统来说，谐波平衡分析方法具有很高的实用性。

### 4. 电路包络分析

电路包络仿真适用于包含调频信号的电路或通信系统，包含了时域与频域的分析方法。它是近年来通信系统的一项标志性技术，非常适合对数字调制射频信号进行快速、全面的分析。电路包络分析借鉴了 SPICE 与谐波平衡两种仿真方法的优点，在时域上，对相对低频的调制信息用时域 SPICE 方法来仿真分析，而对相对高频的载波成分，电路包络仿真则采用类似谐波平衡法的仿真方法，在频域进行处理，这样的处理使仿真器的速度和效率都得到了质的飞跃。

### 5. 电磁仿真分析

ADS 软件提供了一个平面电磁仿真分析功能——矩量法（Momentum）。矩量法是一种将连续方程离散化为代数方程组的计算方法，在电磁场的数值计算中应用广泛，可以对微分方程和积分方程进行数值求解。矩量法将激励和加载分割成若干个部分，并将一个泛函方程化为矩阵方程，从而得到射频电路电磁分布的数值解，激励和加载分割成的部分越多，矩量法的电磁数值解就越精确。它可以用来仿真微带线、带状线和共面波导等的电磁特性、天线的辐射特性，以及电路板上的寄生、耦合效应。所分析的 S 参数结果可直接使用于谐波平衡和电路包络等电路分析中，进行电路设计与验证。

### 6. 射频系统分析

射频系统分析方法可以让使用者模拟评估系统特性，其中系统的电路模型除可以使用行为级模型外，也可以使用元件电路模型进行响应验证。射频系统仿真分析包含了上面介绍的线性分析、谐波平衡分析和电路包络分析等各种分析手段，它们分别用来验证射频系统的无源元件与线性化。系统模型特性、非线性系统模型特性和具有数字调频信号的系统特性。

## 2.1.2 ADS 功能分析

ADS 提供原理图设计和布局图设计。在原理图设计中，可以在数据显示视窗看到仿真结果。ADS 提供丰富的设计辅助工具，包括设计向导，设计指南以及从无源到有源、从器件到系统的设计面板等。

### 1. 设计面板

在原理图设计中有 235 类元件面板可供选择，每个元件面板上有几个到几十个不等的元件，这些元件面板包括时域源、频域源、调制源等各种类型的源，砷化镓器件、双极结型器

件等各种有源器件，集总参数元件、分布参数元件等各种无源器件，滤波器、放大器、混频器等各种系统级部件等，使用者利用元件面板上提供的元部件可以进行设计。

## 2. 设计工具

原理图设计中提供了多种设计工具，使用者可以利用设计工具提供的图形化界面进行传输线计算、史密斯圆图使用、阻抗匹配等辅助设计。

## 3. 设计向导

ADS 提供的设计向导包括放大器设计向导、滤波器设计向导、混频器设计向导、负载电路设计向导和振荡器设计向导等。在原理图设计中，设计向导提供设定界面，设计人员利用设定界面进行电路分析与设计，例如使用者可以利用图形化界面设定参数，设计向导会自动完成电路响应模型。

## 4. 设计指南

ADS 提供许多设计指南，以范例与指令说明的形式示范电路的设计流程。目前提供的设计指南包括 GSM 设计指南、CDMA 设计指南、WLAN 设计指南和 RFIC 设计指南等。这些设计指南可以帮助使用者学习如何快速高效地利用 ADS 进行电路设计，使用者也可以通过软件建立自己的设计指南。

## 5. 仿真与数据显示

可以利用 ADS 对原理图设计进行仿真分析，仿真结果将在数据显示视窗中显示。ADS 将经常重复使用的设计仿真设定成一个模板供设计人员直接使用，在仿真过程中使用者可以利用仿真模板来减少重复设定操作，使仿真设计更为简便。使用者也可以通过软件建立自己的仿真模板。

如果将原理图设计转换成布局图设计，通过对布局图也进行编辑和仿真，同样可以在数据显示视窗中得到仿真结果。

### 2.1.3 ADS 兼容性分析

随着商业化电子软件的不断发展，各种软件的主要功能和侧重点也有所不同，因此如何处理软件的开放和兼容成为不容忽视的问题，设计者在设计中越来越多地关注与其他软件、硬件、测试设备以及元器件连接。ADS 软件具有很好的兼容性，允许与其他软件和测试设备连接，并允许将厂商的元件模型读入。

#### 1. 与其他软件的连接

ADS 软件可以通过接口与其他软件进行连接。可以利用 SPICE 电路转换器将 SPICE 格式的电路图转换成 ADS 格式的电路图进行仿真分析，同样 ADS 格式的电路图也可以转换成 SPICE 格式的电路图进行仿真分析。此外，ADS 软件中的布局转换器可以将其他 EDA 或 CAD 软件产生的布局文件导入 ADS 软件中进行编辑。

#### 2. 与厂商元件模型间的沟通

ADS 软件允许将其他厂商的元件模型读入，供使用者在电路的设计和仿真中使用。



## 2.1.4 初识 ADS

### 1. 启动 ADS

启动 ADS 的方法很多，最常见的方法是从【开始】菜单启动，启动的方法和启动时出现的画面如下。首先启动 Windows 系统，单击【开始】按钮，然后选择【所有程序】→【Advanced Design System 2012】→【Advanced Design System】命令，启动 ADS 软件，如图 2.1 所示。

ADS 启动后，首先出现如图 2.2 所示的画面，随后画面自动消失，系统弹出 ADS 主视窗 [Advanced Design System (Main)]，然后就可以使用 ADS 软件了。

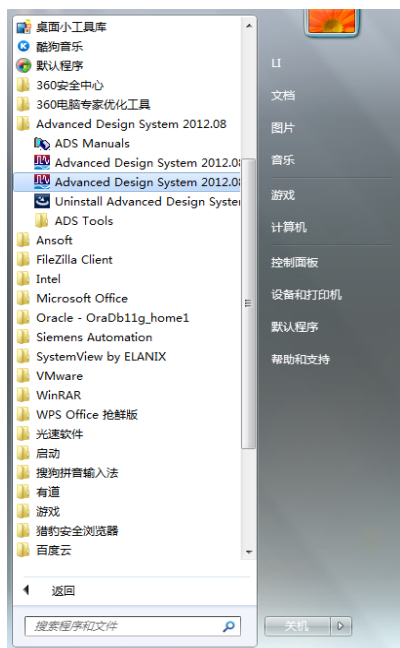



图 2.1 从【开始】菜单启动 ADS 软件



图 2.2 进入 ADS 软件标志

### 2. 退出 ADS

常用的退出 ADS 软件方法有以下几种。

- (1) 单击主视窗中标题栏上的【关闭】按钮，退出 ADS 软件。
- (2) 在主视窗中，单击【File】菜单项，从菜单中选择【Exit】选项，退出 ADS 软件。
- (3) 在主视窗的标题栏上右击，从弹出的快捷菜单中选择【关闭】命令，退出 ADS 软件。
- (4) 在主视窗中按【Alt+F4】组合键，退出 ADS 软件。

## 2.2 ADS 界面介绍

### 2.2.1 主界面

启动 ADS 后，首先弹出的就是主视窗工作界面，它是进入和退出 ADS 系统的标志。主视窗主要是用来创建或打开工作空间，也可以进行文件管理和工作空间管理，但不能做任何射频电路

的设计工作。它主要包含菜单栏、工具栏、文件浏览区和项目管理区等几个部分。在主视窗中可以查看 ADS 自带的例程，这些例程展示了不同电路的设计方法，还可以通过主视窗中的文件浏览区向上浏览到 Windows 系统中的所有文件。下面将对主视窗工作界面进行详细的介绍。

### 1. 工作界面

主视窗的工作界面主要包括菜单栏、标题栏、工具栏、项目管理区、文件浏览区和状态栏，如图 2.3 所示。其中状态栏表明用户当前的操作状态（如用户当前打开 ADS 的路径和鼠标下一步操作的提示等）；标题栏用来显示视窗的名称，ADS 软件用 Advanced Design System (Main) 来表示主视窗。

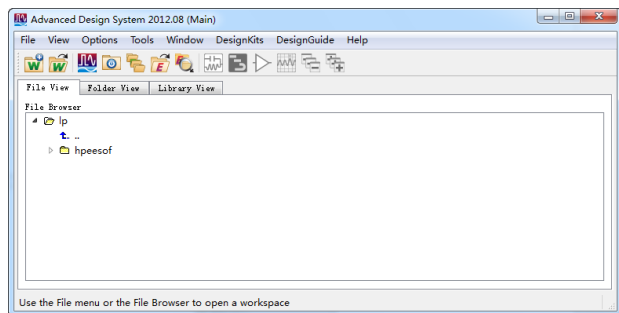


图 2.3 ADS 主视窗

### 2. 菜单栏

ADS 主窗口中的所有操作都可以通过菜单命令来完成，菜单中右侧有下划线字母组合的标记是该命令的热键。菜单栏包括【File】、【View】、【Options】、【Tools】、【Window】、【DesignKits】、【DesignGuide】和【Help】8 个下拉菜单，下面将分别介绍。

#### 1) 【File】菜单

图 2.4 所示为菜单栏中的【File】菜单，它可以实现对工作空间和原理图的创建、打开、保存、复制和删除等操作。为了方便打开最近打开过的工作空间，在【File】菜单最底部列出了最近打开过的工作空间。由于 ADS 规定每次只能打开一个工作空间，所以如果需要打开另外一個工作空间，必须首先关闭当前工作空间。

##### (1) 【File】菜单说明

【New】：建立一个新的工作空间。

【Open】：打开一个已经存在的工作空间。

【Close Workspace】：关闭当前工作空间。

【Convert Project】：将工程文件转换为工作空间文件。

【Delete Workspace】：删除工作空间。

【Save All】：保存所有已经打开的工作空间和原理图。

【Close All】：关闭所有已经打开的工作空间和原理图。

【Manage Libraries】：管理元件库。

【Copy Library】：复制一个元件库。

【Rename Library】：删除一个元件库。

【Archive Workspace】：将选中的工作空间压缩成 ADS 档案文件。

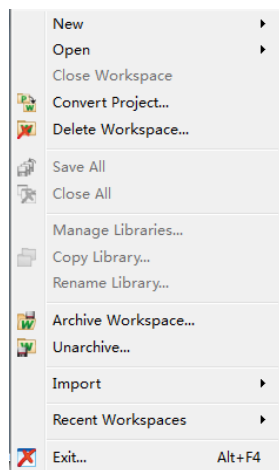


图 2.4 菜单栏中的【File】菜单

【Unarchive】: 将选中的 ADS 档案文件解压缩。

【Import】: 将文件导出为其他格式。

【Recent Workspaces】: 最近使用过的工作空间。

【Exit】: 退出 ADS 设计环境。

## (2) 【File】菜单操作

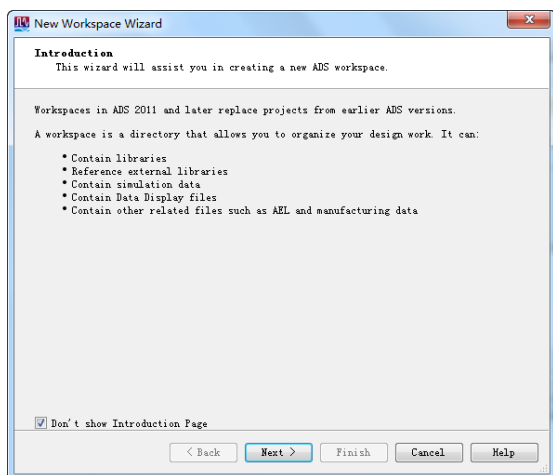
### ① 新建工作空间。具体操作步骤如下。

选择【File】→【New Workspace】选项, 弹出【New Workspace Wizard】对话框, 如图 2.5(a)所示, 选中【Don't show Introduction Page】复选框, 下次新建工作空间时则不再出现此页;

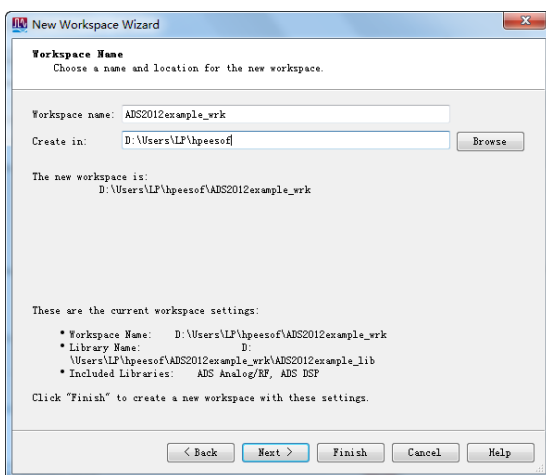
单击【Next】按钮, 在出现的【Workspace Name】对话框中输入工作空间名称和存放路径, 如图 2.5(b)所示;

单击【Next】按钮, 出现【Add Libraries】对话框, 选中【ADS Libraries】复选框, 如图 2.5(c)所示;

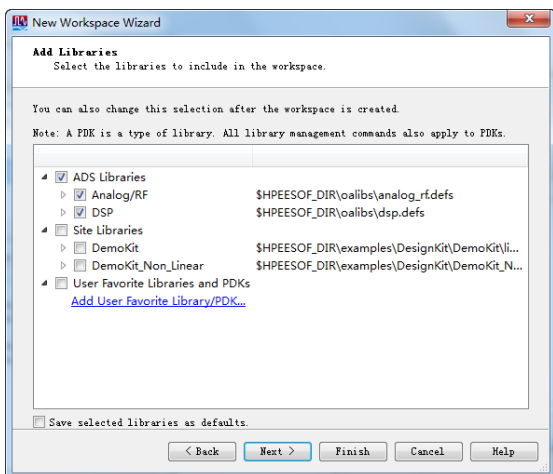
单击【Next】按钮, 在出现的【Library Name】对话框中输入元件库的名称, 如图 2.5(d)所示;



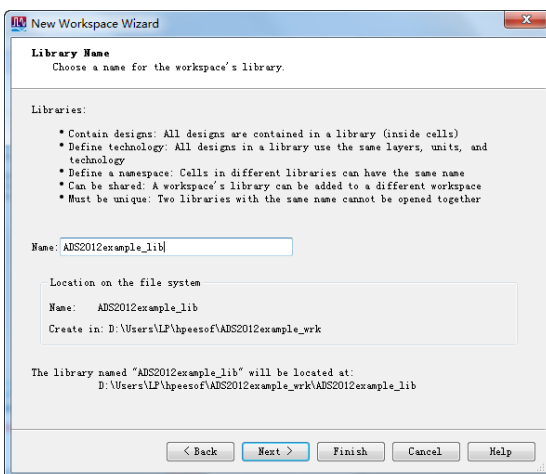
(a) 【Introduction】对话框



(b) 【Workspace Name】对话框

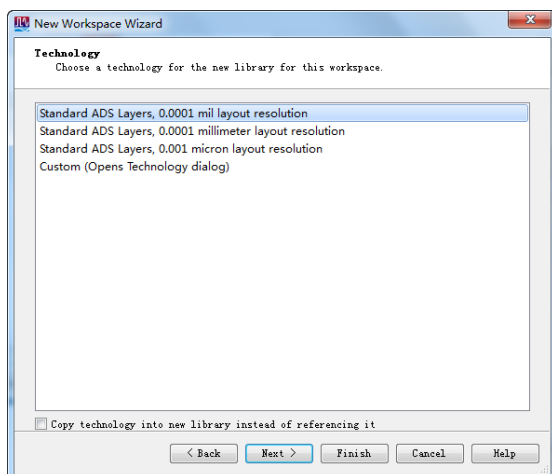


(c) 【Add Libraries】对话框

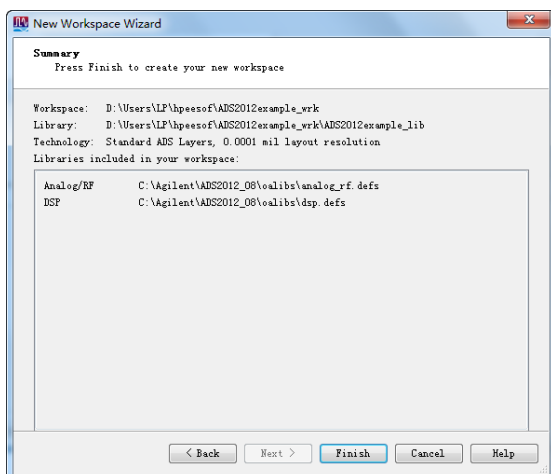


(d) 【Library Name】对话框

图 2.5 在主视窗创建一个工作空间



(e) 【Technology】对话框



(f) 【Summary】对话框

图 2.5 在主视窗创建一个工作空间（续）

单击【Next】按钮，默认选择印制板的设计工艺【Standard ADS Layers, 0.0001 mil layout resolution】，如图 2.5(e)所示。

单击【Next】按钮，出现的【Summary】对话框，如图 2.6(f)所示，检查创建的工作空间的所有信息，若不正确，单击【Back】按钮进行修改，若没有错误，单击【Finish】按钮完成工作空间的创建。

一个工作空间包括多个电路原理图、多个电路布局图和多个电路仿真结果 ADS 软件使用主视窗创建工作空间，然后用工作空间组织用户的设计。

② 打开一个已经存在的工作空间。具体操作步骤如下。

选择【File】→【Open Workspace】选项，在弹出如图 2.6 所示的【Open Workspace】对话框中，选择要打开的工作空间的名称，单击【OK】按钮，打开工作空间。

还可以在主视窗中的文件浏览区（File View）选定要打开的工作空间，双击打开，如图 2.7 所示。

需要注意，由于 ADS 一次只允许打开一个工作空间，因此在打开另一个已经存在的工作空间时，当前工作空间会自动关闭，关闭前软件会提示保存对该工作空间进行的修改。

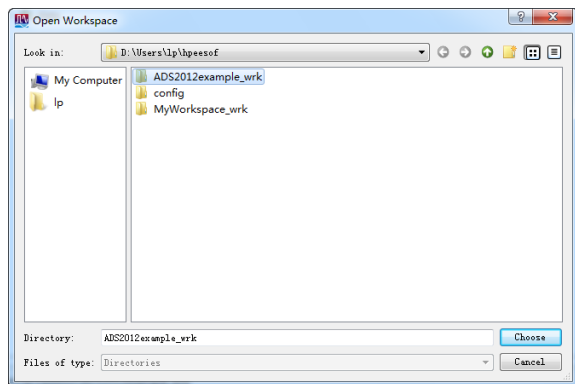


图 2.6 在主视窗打开一个已经存在的工作空间

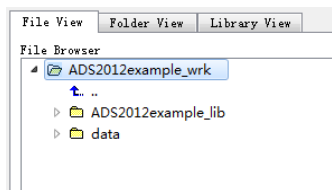


图 2.7 通过主视窗中的文件浏览区打开一个已经存在的工作空间

## ③ 复制元件库。

步骤：选择【File】→【Copy Library】选项，利用弹出如图 2.8 所示的【Copy Library】对话框定位并复制。

## ④ 删除工作空间。

步骤：选择【File】→【Delete Workspace】选项，在弹出如图 2.9 所示的【Delete Workspace】对话框选定要删除的工作空间，单击【OK】按钮即可删除工作空间。

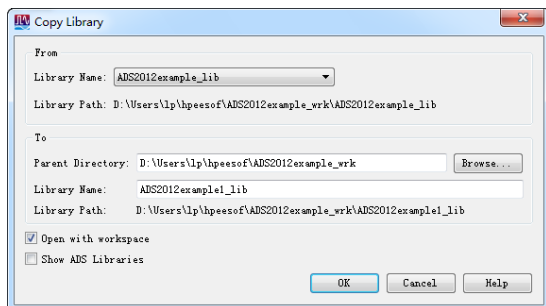


图 2.8 【Copy Library】对话框

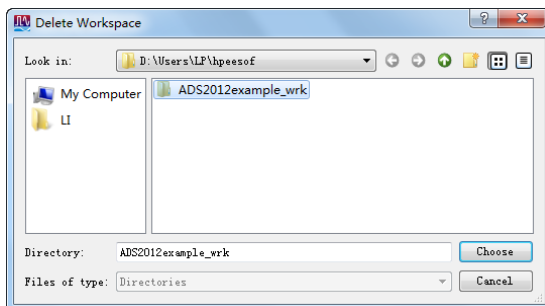


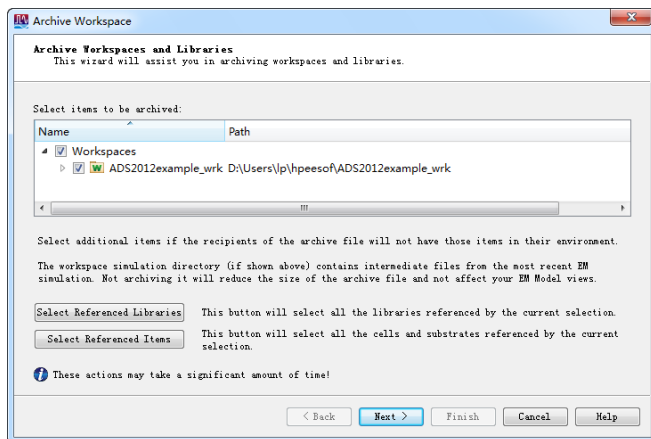
图 2.9 【Delete Workspace】对话框

## ⑤ 压缩工作空间/解压档案文件。

压缩步骤：选择【File】→【Archive Workspace】选项，在弹出的【Archive Workspaces and Libraries】对话框中，选中要压缩的工作空间，如图 2.10(a)所示；单击【Next】按钮，选择压缩文件存放的路径，单击【Finish】按钮完成压缩，如图 2.10(b)所示。工作空间压缩后的文件格式为“\*.7zads”。

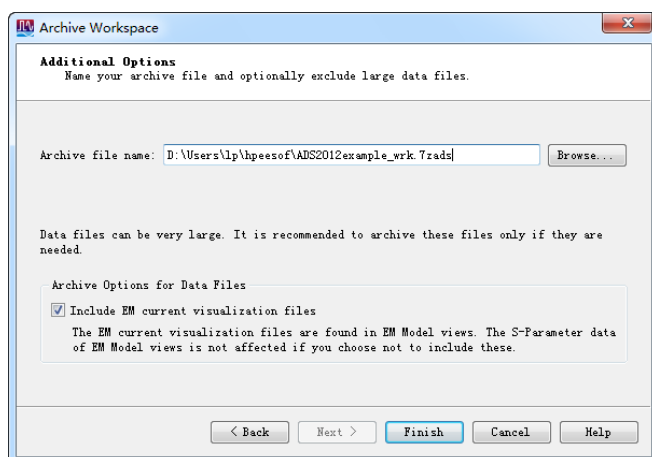
解压步骤：选择【File】→【Unarchive】选项，在弹出的【Select An Archive File】对话框中将选择要解压的 ADS 文件，如图 2.11(a)所示；单击【打开】按钮，在弹出的【Copy or Unarchive】对话框中，保持默认选项不变，如图 2.11(b)所示；单击【Next】按钮，在弹出的【Select Items to Archive】对话框中将选择要解压的元件库文件，单击【Finish】按钮完成文件的解压，如图 2.11(c)所示。

利用【File】菜单中的【Archive Workspace】和【Unarchive】项可以将某个工作空间进行压缩或对档案文件解压缩。



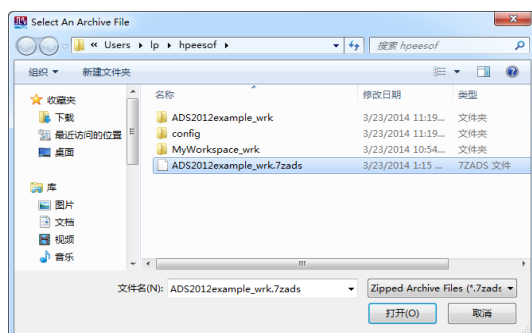
(a) 【Archive Workspaces and Libraries】对话框

图 2.10 压缩工作空间

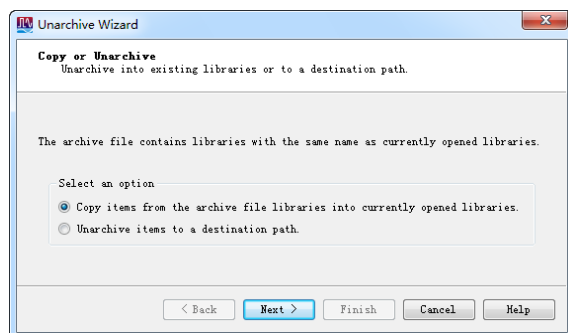


(b) 【Additional Options】对话框

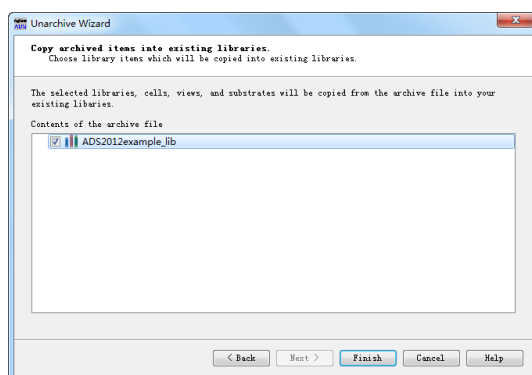
图 2.10 压缩工作空间 (续)



(a) 【Select An Archive File】对话框



(b) 【Copy or Unarchive】对话框



(c) 【Select Items to Archive】对话框

图 2.11 解压工作空间

## ⑥ 创建设计。

步骤：选择【File】→【New Schematic】选项，自动弹出如图 2.12 所示的【New Schematic】对话框。在【New Schematic】对话框中，输入新建设计的名称，选择打开一个新设计的步骤如图 2.12 所示。

在创建一个新的设计时，ADS 会提供许多模板，每个模板都包含了大部分初始设置、原理图和仿真的配置及数据分析，选定模板后软件会自动完成相应的配置。

⑦ 打开一个已经存在的设计。

步骤：选择【File】→【Open】→【Schematic】选项，在自动弹出的【Open Cell View】对话框中，选择要打开的工作空间名称和设计名称，单击【OK】按钮，打开一个已经存在的设计，如图 2.13 所示。

在主视窗中既可以打开已经存在的工作空间，又可以打开已存在的设计，不过 ADS 每次只允许打开一个工作空间，却可以同时打开同一工作空间下的多个设计。

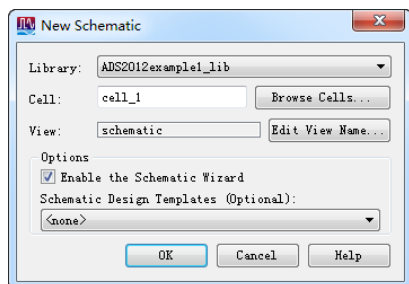


图 2.12 在主视窗新建一个设计

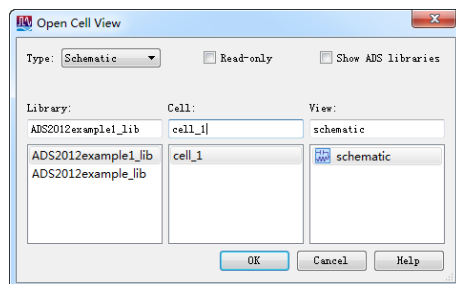


图 2.13 在主视窗打开一个已经存在的设计

⑧ 复制元件库。

步骤：选择【File】→【Copy Library】选项，利用弹出如图 2.14 所示的【Copy Library】对话框定位并复制元件库。

⑨ 删除工作空间。

步骤：选择【File】→【Delete Workspace】选项，在弹出如图 2.15 所示的【Delete Workspace】对话框中选定要删除的设计，单击【Choose】按钮删除设计。

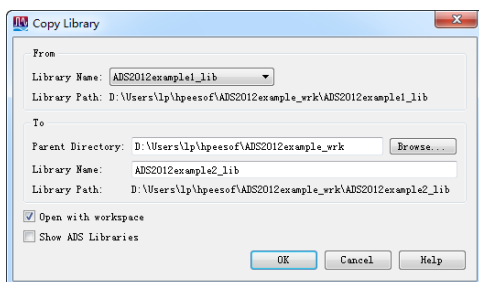


图 2.14 【Copy Library】对话框

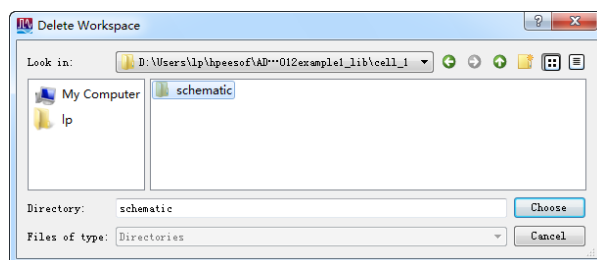


图 2.15 【Delete Workspace】对话框

## 2) 【View】、【Options】、【Tools】和【Window】菜单

### (1) 【View】菜单

图 2.16 所示为菜单栏中的【View】菜单，它可以用来管理主视窗的外观和显示内容。

说明：

【Design Hierarchies】：显示当前正在打开工作空间的设计层次。

【Refresh】：更新显示的视窗。

【Toolbar】：显示工具栏。



## (2) 【Options】菜单

图 2.17 所示为菜单栏中的【Options】菜单，它主要是对 ADS 参数和印制板的设计工艺进行设置。

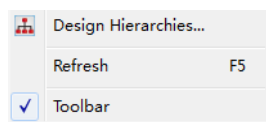


图 2.16 菜单栏中的【View】菜单

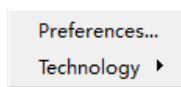


图 2.17 菜单栏中的【Options】菜单

说明：

【Preferences】：设置 ADS 的各种参数。

【Technology】：设置印制板的设计工艺。

## (3) 【Tools】菜单

菜单栏中的【Tools】菜单的主要功能是对 ADS 软件系统进行各种设置和管理，【Tools】菜单如图 2.18 所示。

说明：

【Configuration Explorer】：查看或设置 ADS 软件系统的安装信息、用户信息和工作空间信息等基本信息。

【Examples Search】：查找 ADS 自带的例程。

【Start Recording Macro】：打开一个宏记录。

【Stop Recording Macro】：关闭一个宏记录。

【Playback Macro】：重新打开一个宏记录。

【Text Editor】：打开写字板程序。

【Command Line】：打开命令行视窗。

【Hot Key/Toolbar Configuration】：设置快捷键和工具栏的内容。

【Manage ADS AEL Addons】：管理 AEL 语言组件。

【License Manager】：管理 ADS 软件的相关许可信息。

## (4) 【Window】菜单

利用菜单栏中的【Window】菜单可以对 ADS 软件各视窗进行管理。为了方便使用者选择并打开所需要的视窗，在【Window】菜单的最下方，列出了最近打开的视窗。【Window】菜单如图 2.19 所示。

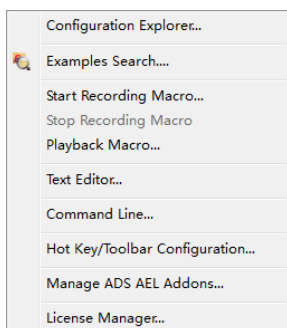


图 2.18 菜单栏中的【Tools】菜单

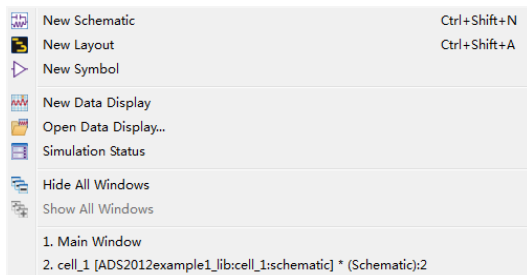


图 2.19 菜单栏中的【Window】菜单



说明:

【New Schematic】: 打开一个新的原理图设计视窗。

【New Layout】: 打开一个新的版图设计视窗。

【New Symbol】: 打开一个新的元件设计视窗。

【New Data Display】: 打开一个新的数据显示视窗。

【Open Data Display】: 打开一个已经存在的数据显示视窗。

【Simulation Status】: 打开仿真状态视窗。

【Hide All Windows】: 隐藏所有视窗。

【Show All Windows】: 显示所有视窗。

3) 【DesignKits】、【DesignGuide】和【Help】菜单

(1) 【DesignKits】菜单

利用 ADS 进行仿真时, 有时设计者会需要一个元件库, 元件库与模型文件和仿真数据相连接, 厂商元件模型可以通过【DesignKits】读入。ADS 元件库结构可以被任何技术或任何处理过程所使用, 以便读入一个重复使用的元件。菜单栏中的【DesignKits】菜单如图 2.20 所示。

说明:

【Unzip Design Kit】: 解压已经安装的设计包。

【Manage Favorite Design Kits】: 管理常用的设计包。

【Manage Libraries】: 管理元件库。

(2) 【DesignGuide】菜单

菜单栏中的【DesignGuide】菜单可以为不同的使用者提供与 ADS 设计向导相关的设置和管理, 【Design Guide】菜单如图 2.21 所示。

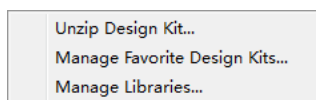


图 2.20 菜单栏中的【DesignKits】菜单

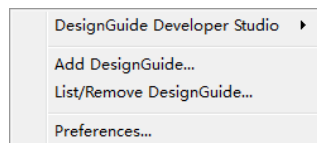


图 2.21 菜单栏中的【DesignGuide】菜单

说明:

【Design Guide Developer Studio】: 在 ADS 软件中编辑设计向导。

【Add Design Guide】: 增加设计向导。

【List/Remove Design Guide】: 将已经安装的设计向导列表/删除。

【Preferences】: 设置设计向导的参数。

(3) 【Help】菜单

【Help】菜单包括【Main Window Help】、【Topics and Index】、【Getting Started with ADS】、【Agilent EEsof Web Resources】和【About Advanced Design System】几部分, 它的主要功能是为使用 ADS 的用户提供帮助并显示版权等信息。在使用 ADS 过程中, 熟练使用 Help 可以提高设计效率。【Help】菜单如图 2.22 所示。

### 3. 工具栏

工具栏位于菜单栏的下面, 包含了 ADS 各种常用工具的快捷图标按钮, 用户可以单击快捷按钮方便地进行相关操作。主视窗默认的快捷按钮如图 2.23 所示, 这些快捷按钮相当于菜

单栏中的某些常用菜单项,熟悉工具栏图标按钮的功能可以提高设计效率。除工具栏上默认的快捷按钮外,用户还可以通过执行【Tools】→【Hot Key/Toolbar Configuration】命令进行工具栏显示按钮的添加或者删除。

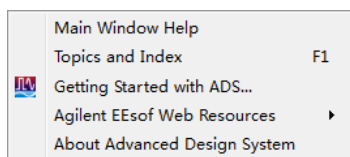


图 2.22 菜单栏中的【Help】菜单



图 2.23 工具栏

### 1) 工具栏说明

ADS 默认的工具栏有 11 个快捷按钮,相当于菜单栏中的某些菜单项,它们分别是【New Workspace】、【Open Workspace】、【Getting Started with ADS】、【Open An Example Workspace】、【Examples Search】、【New Schematic Window】、【New Layout Window】、【New Data Display Window】、【Hide All the Windows】、【Show All Windows】。下面依次介绍。

- : 新建一个工作空间。
- : 打开已经存在的工作空间。
- : 开始窗口即新手帮助。
- : 显示 ADS 自带实例目录。
- : 查找自带实例。
- : 新建原理图设计窗口。
- : 新建布局图设计窗口。
- : 新建元件图设计窗口。
- : 新建数据显示视窗。
- : 隐藏所有视窗。
- : 显示所有视窗。

### 2) 工具栏操作举例

以 ADS 自带实例 Example 相关操作为例,这里主要讲解快捷按钮【Open An Example Workspace】和快捷按钮【Examples Search】的操作。

#### (1) 快捷按钮【Open An Example Workspace】

——查看 ADS 自带实例目录

步骤: 单击【Open An Example Workspace】按钮,在弹出的【Select An Archive File】对话框中,可以看到实例目录,ADS 为用户提供了许多实例,既包括各种练习和学习指导,也包括 GSM、CDMA、WLAN 等实例。ADS 自带的全部实例目录如图 2.24 所示。

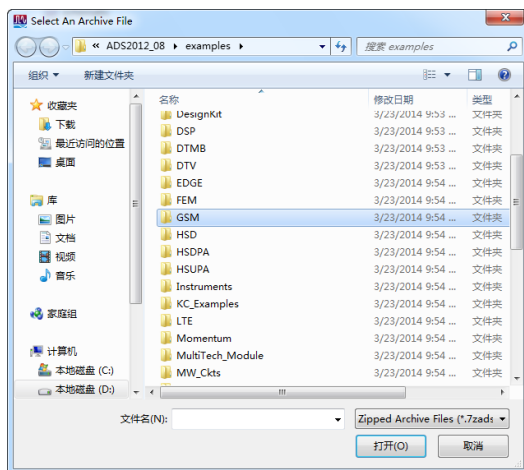


图 2.24 ADS 自带的全部实例

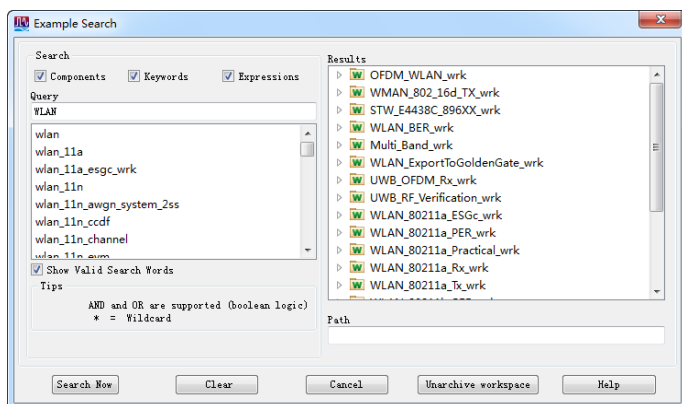
#### (2) 快捷按钮【Examples Search】——查询自带例程

步骤: 首先按主视窗工具栏中的【Examples Search】按钮,如图 2.25(a)所示,自动弹出

【Example Search】对话框,然后在对话框的【Query】文本框中输入 WLAN,此时对话框的【Results】列表区域中会列出所有自带实例中的 WLAN,【Example Search】对话框如图 2.25(b)所示。



(a) 选择主视图工具栏中的快捷按钮



(b) 【Example Search】对话框

图 2.25 查询 ADS 自带例程中的放大器

#### 4. 文件浏览区、项目管理区和元件库浏览区

在 ADS 主视图,有文件浏览区、项目管理区和元件库浏览区,在文件浏览区用户可以方便地查找某个工作空间,只需浏览“我的电脑”中的文件夹,从中打开已经存在的工作空间和文件;当文件浏览区的内容确定后,项目管理区显示与文件浏览区相关的内容,在项目管理区中可以清晰地查看当前打开工作空间的层次结构,方便对工作空间进行管理;元件库浏览区可以查看所有的元件库的层次结构。

##### (1) 文件浏览区

在文件浏览区中可以查看“计算机”中的文件夹,并从中打开已经存在的工作空间和文件。用户创建的设计以工作空间的方式来管理的,也就是说用户主要是在一个工作空间下设计各种原理图和版图。在文件浏览区中可以方便地查看指定工作空间的工作空间目录,如果用户进入子目录后想返回上一级目录,可以通过单击向上的箭头图标实现。文件浏览区如图 2.26 所示。

##### (2) 项目管理区

项目管理区中可以查看当前打开工作空间的层次结构,ADS 可以通过很多方法进入 ADS 原理图和版图,既可以从一个原理图或版图进入另一个原理图或版图,也可以从主视图进入原理图和版图。其中最常采用的方式就是从主视图的项目管理区进入原理图和版图,进入后用户通过设计列表就可以清楚地查看工作空间下所有原理图、版图及分级信息,并可以双击打开。项目管理区如图 2.27 所示。

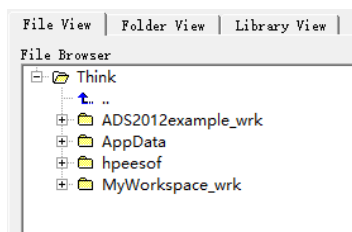


图 2.26 文件浏览区

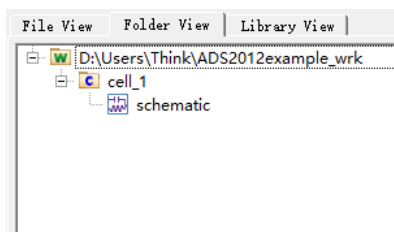


图 2.27 项目管理区

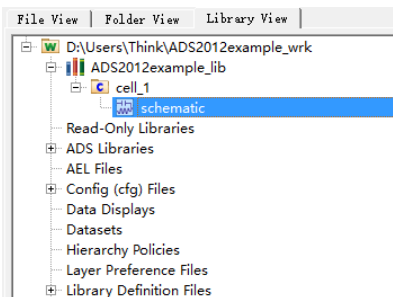


图 2.28 元件库浏览区

### (3) 元件库浏览区

ADS 的元件库是一个重要组成部分, 它提供了丰富的元件应用模型, 用户可以在元件库中搜索自己所需元件。通过在每个工作空间中都建立各自的元件库, 记录了元件的使用和记录信息, 为用户的使用提供了很大的便利。在 ADS 主窗口中的元件库浏览区, 可以查看 ADS 元件库目录, 也可以看到每个工作空间的层次结构, 用户可以在元件库浏览区进入设计的原理图和版图。元件库浏览区如图 2.28 所示。

## 2.2.2 原理图界面

原理图视窗主要用于电路原理图的设计和仿真, 它是用户进行电路原理图仿真时用得最多的窗口。一个原理图设计窗口包含标题栏、菜单栏、工具栏、元件面板列表、元件面板、历史元件、提示面板和画图区等。原理图视窗为用户提供了方便的设计原理图的环境, 通过原理图视窗用户可以实现创建和修改电路图, 放置仿真控制器, 指定层及参数, 添加变量和方程, 使用文本和插入注释, 生成布局图等功能。

### 1. 工作界面

原理图视窗的工作界面主要包括标题栏、菜单栏、工具栏、元件面板列表、元件面板、历史元件列表、画图区和状态栏, 如图 2.29 所示。用户使用工作界面上的菜单栏、工具栏、元件面板列表、元件面板和历史元件列表在画图区上创建和修改设计, 并完成仿真与优化等工作。工作界面中的状态栏给出了鼠标下一步操作的提示、鼠标在画图区上所处的坐标位置等用户当前的操作状态, 以帮助用户完成设计。工作界面中的标题栏主要显示整个窗口的信息, 包括窗口类型、工作空间名称、电路名称、类型和电路图编号。【Schematic】标明该视窗是 ADS 的原理图视窗。

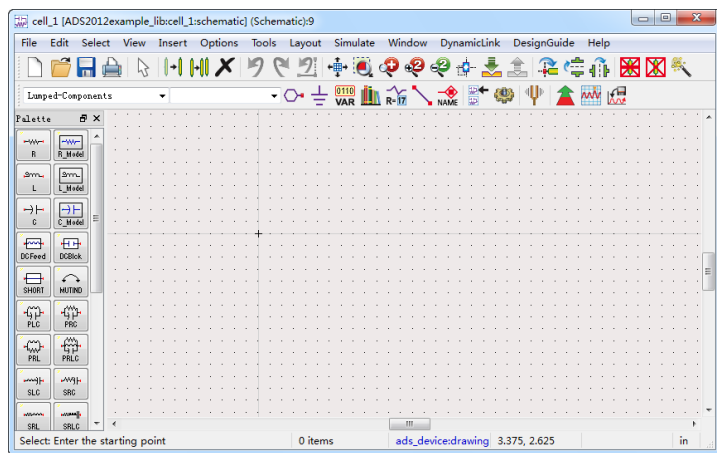


图 2.29 原理图视窗的工作界面

### 2. 菜单栏

主视窗的菜单栏中各个菜单包含了用户在原理图设计窗口中所有可执行的操作, 可以方

便地通过鼠标操作来实现各种命令。菜单栏中有【File】、【Edit】、【Select】、【View】、【Insert】、【Options】、【Tools】、【Layout】、【Simulate】、【Window】、【DynamicLink】、【DesignGuide】和【Help】下拉菜单，下面对上述菜单分别加以介绍。

### 1) 菜单说明

**【File】菜单：**菜单中包含了与文件相关的操作，除了建立、打开、关闭、保存、导入、导出和打印等基本的文件操作，还包含打开历史文件的操作。

**【Edit】菜单：**菜单中包含了与编辑相关的操作，即取消上一操作、结束命令、复制、粘贴、剪切、删除元件或电路图、旋转元件、移动元件、元器件参数编辑、对称镜像元件、插入线、文本编辑、插入元件和插入引脚标签等。

**【Select】菜单：**菜单中包含了与选定相关的操作，包括选定全部电路图、选定或者不选定电路中某些元件名的电路部分等。

**【View】菜单：**菜单中包含了与视图外观和显示相关的操作，包括显示部分视图、显示全部视图、隐藏部分视图、隐藏全部视图、缩小视图、放大视图、进入子视图、创建原理图符号、显示工具栏、编辑原理图符号、显示元件面板和显示状态栏等。

**【Insert】菜单：**菜单中包含了与插入相关的操作，包括在编辑电路图的过程中插入地、变量、连接线、节点和文字等内容。

**【Options】菜单：**菜单中包含了在原理图视窗进行基本设置的操作，包括设置原理图画图区格点的大小和间隔、物理量的单位、元器件引脚的体积和颜色等。

**【Tools】菜单：**菜单中包含了原理图设计中常用的工具，包括传输线的计算、阻抗的匹配、史密斯圆图的使用、设置元件面板的内容、文件的导入和导出、设置快捷键和设置工具栏的内容等。

**【Layout】菜单：**菜单中包含了由电路原理图生成布局图的基本操作。

**【Simulate】菜单：**菜单中包含了与仿真相关的操作，包括开始仿真、仿真设置、停止仿真、调谐、仿真精灵、高亮节点等内容。

**【Window】菜单：**菜单中包含了与视窗管理相关的操作，包括打开一个原理图视窗、打开一个布局图视窗、关闭视窗、打开一个数据显示视窗、观察仿真状态视窗等。在菜单的最下面还列出了已经打开的视窗，在这里可以方便地选取所需的视窗。

**【DynamicLink】菜单：**菜单中包含了与动态链接相关的操作。

**【DesignGuide】菜单：**菜单中包含了与设计向导相关的操作，包括放大器设计向导、蓝牙设计向导、滤波器设计向导、振荡器设计向导、混频器设计向导、锁相环设计向导、负载电路设计向导、TDMCDMA 设计向导、WLAN 设计向导和 CDMA2000 设计向导等。

**【Help】菜单：**菜单中包含了与帮助相关的操作，包括帮助选项、主题索引、agilent 网络资料信息和 ADS 版本信息等。

### 2) 菜单操作举例

原理图视窗的菜单操作在电路图的设计仿真中使用频率较高，而大部分操作只有在具体设计环境中才能展示出来，因此这里只举例说明原理图视窗的菜单操作。

#### (1) 在原理图视窗创建一个新设计

具体操作步骤如下。

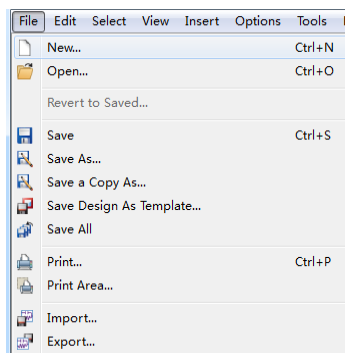
① 在原理图视窗，选择【File】→【New】选项，如图 2.30(a)所示。

② 在弹出的【New Schematic】对话框中，需要输入新设计的名称，并选择网络类型、

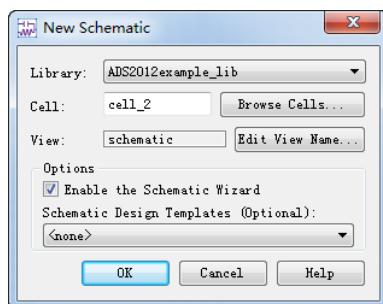
视窗种类、设计模板和这个设计中的长度单位等。【New Schematic】对话框如图 2.30(b)所示, 这里新建设计的名称为默认的【cell\_2】。

③ 单击【OK】按钮, 关闭【New Schematic】对话框, 这时会自动弹出一个新建的设计视窗【cell\_2】和【Schematic Wizard】对话框, 如图 2.30(c)所示。

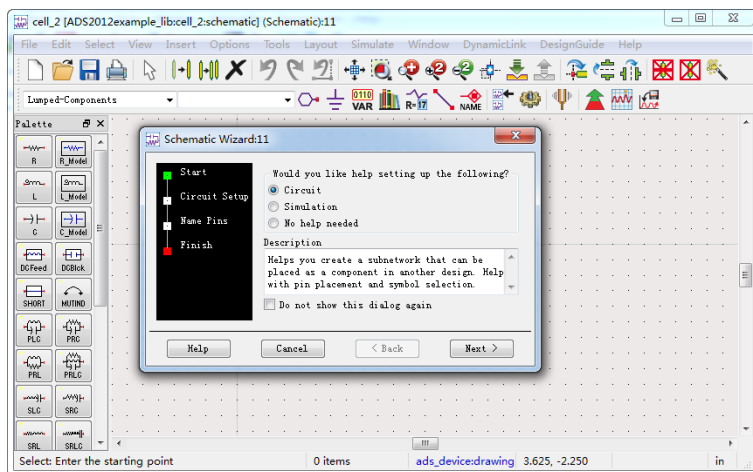
④ 【cell\_2】为新创建的原理图视窗, 关闭【Schematic Wizard】对话框, 就可以在新建的【cell\_2】设计视窗上设计电路图了。



(a) 选择【File】菜单中的【New】选项



(b) 【New Schematic】对话框



(c) 新建原理图视窗【cell\_2】和【Schematic Wizard】对话框

图 2.30 创建一个新设计

这里还有另一种方法可以在原理图视窗创建一个新设计。首先选择【Window】→【Schematic】选项, 然后在弹出的新原理图视窗上选择【File】→【Save As】选项, 将新原理图重新命名, 还可以在新原理图上选择【Insert】→【Template】选项, 选择使用原理图模板。

(2) 在原理图视窗打开一个已经存在的设计

具体操作步骤如下。

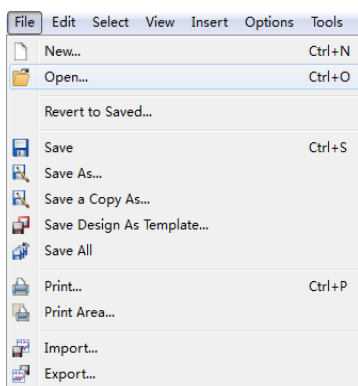
① 在原理图视窗选择【File】→【Open】选项, 如图 2.31(a)所示。

② 在弹出如图 2.31(b)所示的【Open Cell View】对话框中选择要打开的设计。

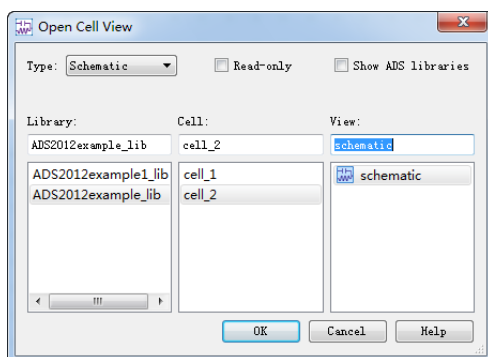
### 3. 工具栏

原理图视窗的工具栏包括了一些快捷按钮, 主要是新建和打开原理图文件、保存文件、

打印原理图等针对文件或者整个原理图窗口的操作，也包括移动元件、旋转元件、删除元件、取消操作、放大或缩小原理图等针对原理图编辑的操作，这些快捷按钮是菜单栏中一些常用的菜单项，可以为电路图的设计提供便利操作。原理图视窗的工具栏，如图 2.32 所示。



(a) 选择【File】菜单中的【Open】项



(b) 【Open Cell View】对话框

图 2.31 打开一个已存在的设计

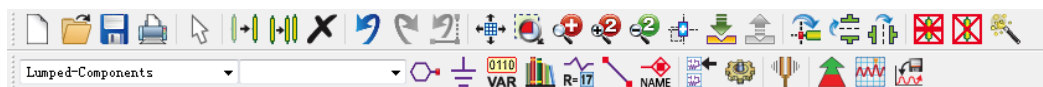


图 2.32 原理图视窗的工具栏

原理图视窗的工具栏的按钮可以大致分为以下几类。

- ① 文件操作按钮：创建原理图、打开原理图和保存原理图等。
- ② 元件编辑按钮：移动元件、复制元件、删除元件和旋转元件等。
- ③ 原理图外观和显示的操作按钮：观看全部原理图、放大原理图和缩小原理图等。
- ④ 仿真操作按钮：调谐、仿真和仿真精灵等。
- ⑤ 插入操作按钮：插入地、插入端口、插入节点、插入导线和插入元件库元件等。

此外，用户还可以根据自己需要对工具栏进行调整，如果在原理图视窗不想看到工具栏，可以通过选择【View】→【Toolbar】命令在原理图视窗隐藏工具栏；如果要增加、减少工具栏中的快捷按钮可以通过【Tool】→【Hot Key/Toolbar Configuration...】命令进行设置。

#### (1) 工具栏说明

：新建一个电路图设计。需要输入新建电路图的名称，并选择网络类型、视窗种类电路图模板和这个电路图中的长度单位等。

：打开一个已经存在的电路图。

：保存当前电路图。

：打印当前电路图。

：结束当前操作，返回元件选择模式。

：移动元件。

：复制并移动元件。

：删除元件。

：取消上一次操作。





: 取消最顶端条目。



: 删除多边形或者折线上的最后一条线段。



: 查看绘图区的所有元件。



: 将绘图区指定区域的视图放大。



: 将绘图区指定点的视图放大。



: 将绘图区的视图放大 2 倍。



: 将绘图区的视图缩小为 1/2。



: 调整指定点到绘图区中心。



: 查看一个母电路中的子电路内容。



: 跳出子电路, 回到母电路。



: 旋转元件。



: 元件相对于 x 轴做镜像。



: 元件相对于 y 轴做镜像。



: 使元件失效、短路或使元件有效。



: 使元件失效或使元件有效。



: 仿真精灵。这个按钮提供智能仿真向导。



: 插入端口。



: 插入接地点。



: 插入变量控件。变量控件中可以有多个变量, 每个变量需要命名, 并需要赋值或给出变化范围等, 变量控件的内容可以在电路图中显示出来。



: 显示元件库列表。ADS 元件库中包含原理图元件面板中的所有元件, 以及多家厂商不同型号的元器件等。



: 编辑元件参数。可以编辑源、电阻、电容、电感、二极管、晶体管和传输线等各种元件的不同参数。



: 插入连线。



: 插入线或元件引脚标签。



: 选择仿真的视窗。



: 执行仿真。可以执行所有仿真, 包括执行直流仿真、交流仿真、S 参数仿真、谐波平衡仿真、电路包络仿真等。



: 调谐元件参数。



: 交互式优化设计参数。



: 新建数据显示窗口。



: 执行数据文件工具。

## (2) 工具栏操作举例

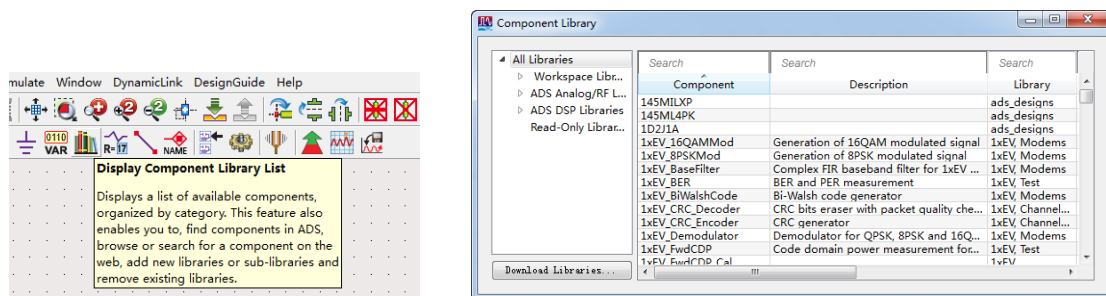
在电路的原理图设计中, 工具栏使用频率较高, 但是对工具栏的大部分操作, 只有在具体的设计环境中才能展示出来, 因此这里只说明工具栏中快捷按钮【Display Component Library List】的操作方法, 工具栏的该快捷按钮可以显示元件库列表。

① 单击工具栏中的【Display Component Library List】按钮, 如图 2.33(a)所示。

② 这时会弹出【Component Library】对话框, 如图 2.33(b)所示。在该对话框的【Search】处输入搜索内容, 对元件进行分类搜索。



如果用户希望采用 ADS 软件元件库外的元件, 可以从各元件厂商的网站下载元件参数, 并可以将下载结果加到【Display Component Library List】中, 以备设计时使用。



(a) 单击工具栏中的【Display Component Library List】按钮

(b) 【Component Library】对话框

图 2.33 打开元件库

#### 4. 元件面板列表、元件面板和历史元件列表

原理图中的元件面板列表将同一类元件列在同一个列表之中进行管理。元件面板列表的默认状态是 Lumped-Components (集总参数元件), 列表包括各种源列表、仿真控件列表和传输线列表等几十项内容, 元件面板配合元件面板列表使用, 使用原则如下。

- ① 当元件面板列表是源时, 元件面板上是相应类型的各种源。
- ② 当元件面板列表是传输线时, 元件面板上是相应类型的各种传输线。
- ③ 当元件面板列表是默认状态时, 元件面板上是电阻、电感和电容等各种集总参数元件。

当选定元件面板列表中的某一项后, 元件面板就确定不变了, 在元件面板上可以选择任意一个元件插入电路中, 组成电路图。

在进行原理图设计时, 常常会使用曾经用过的原件, ADS 在历史原件列表中列出了用户设计电路时曾使用过的元件, 方便用户使用。

##### 1) 元件面板列表

ADS 软件在元件面板列表中将几百类元件分成几十项, 这几十项列在元件面板列表的下拉菜单中, 如图 2.34 所示。下面分别对元件面板列表以及每种列表对应的元件面板内容加以说明。

**【Lumped-Components】:** 集总参数元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形式的电阻、电感、电容、短路、开路和变压器等集总参数元件, 以及由上述元件组合而成的集总参数元件。

**【Lumped-With Artwork】:** 带有封装的集总参数元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中依旧是各种形式的电阻、电感和电容等集总参数元件, 但与【Lumped-Components】不同的是这个面板中的集总参数元件是带有封装模型的。

**【Sources-Controlled】:** 受控源模型元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形式的受控源模型, 包括压控电压源和压控电流源等模型元件。

**【Sources-Freq Domain】:** 频域源模型元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各

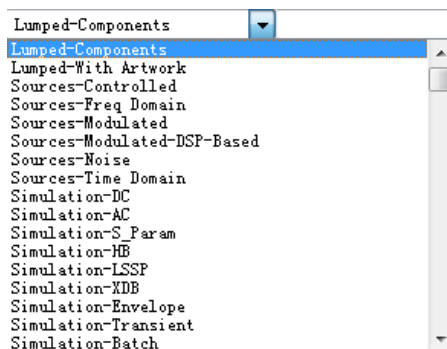


图 2.34 元件面板列表

种形式的频域源模型，包括直流电压源、直流电流源、单频电压源、单频电流源、单频功率源、多频电压源、多频电流源、多频功率源和各种噪声源等模型元件。

**【Sources-Modulated】**：调制源模型元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形式的调制源模型，这些调制源模型可以产生 CDMA、DECT、GSM 和 PHS 等信号。

**【Sources-Modulated-DSP-Based】**：基于 DSP 的调制源模型元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中各种形式的调制源是基于数字信号处理的。

**【Sources-Noise】**：噪声源模型元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形式的噪声源，包括噪声电压源和噪声电流源等模型元件。

**【Sources-Time Domain】**：时域源模型元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形式的时域源模型，包括直流电压源、直流电流源、阶梯电压源、阶梯电流源、脉冲电压源和脉冲电流源等模型元件。

**【Simulation-DC】**：直流仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在直流仿真时使用，用来设置直流仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-AC】**：交流仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在交流仿真时使用，用来设置交流仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-S\_Param】**：参数仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在 S 参数仿真时使用，用 i 设置 S 参数仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-HB】**：谐波平衡法仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在谐波平衡仿真时使用，用来设置谐波平衡仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-LSSP】**：大信号 S 参数仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在大信号 S 参数仿真时使用，用来设置大信号 S 参数仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-XDB】**：增益压缩仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在增益压缩仿真时使用，用来设置增益压缩仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-Envelope】**：电路包络仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在电路包络仿真时使用，用来设置电路包络仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-Transient】**：瞬态仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在瞬态仿真时使用，用来设置瞬态仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-Instrument】**：工具仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板为各种仿真提供必要的工具，如提供 BJT 仿真辅助工具等。

**【Simulation-Budget】**：预算仿真控件列表。这个元件面板列表对应的元件面板在预算仿真时使用，用来设置预算仿真时的各种参数、设置显示模板控件和设置测量等式等。

**【Simulation-Sequencing】**：仿真排序控件列表。这个元件面板列表对应的控件用来给一个仿真中的多层仿真排序。

**【Optim/Stat/Yield/DOE】**：优化/统计/成品率/实验设计控件列表。这个元件面板列表对应的控件在电路设计中经常使用，用于电路的优化、统计等。

**【Probe Components】**：参量显示元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板给出了多个显示元件，包括显示电流元件、显示 S 参数元件等。

【Data Items】：数据管理元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中的元件主要是对 ADS 中的数据条目进行管理。

【TLines-Ideal】：理想传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形状和特性的传输线模型，这些模型都是理想模型。

【TLines-Microstrip】：微带传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形状和特性的微带线模型，在设计微带电路时使用。

【TLines-Printed Circuit Board】：印刷电路板传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形状和特性的印刷电路板传输线，在设计印刷电路板时使用。

【TLines-Stripline】：带状传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有各种形状和特性的带状传输线，在设计带状线电路时使用。

【TLines-Suspended Substrate】：悬置微带传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种形状和特性的悬置微带传输线，在设计悬置微带传输线电路时使用。

【TLines-Finline】：鳍线传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种形状和特性的鳍线传输线，在设计鳍线传输线电路时使用。

【TLines-Waveguide】：波导传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种形状和特性的波导传输线，在设计波导传输线电路时使用。

【TLines-Multilayer】：多层传输线元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种形状和特性的多基层传输线，在设计多基层传输线电路时使用。

【Passive-RF Circuit】：射频电路无源元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种形状和特性的射频电路无源元件，在射频电路设计时使用。

【Eqn Based-Linear】：基于方程的线性网络元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种线性网络模型，包括多端口 S 参数和 R 参数网络模型元件等。

【Devices-Linear】：线性元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种线性有源元件，包括线性二极管、线性晶体管等有源元件。

【Devices-BJT】：BJT（双极结晶体管）元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和特性的双极结元件，可以在电路设计时选用。

【Devices-Diodes】：二极管元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和特性的二极管元件，可以在二极管电路设计时选用。

【Devices-GaAs】：GaAs（砷化镓）元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和特性的砷化镓元件，可以在电路设计时选用。

【Devices-JFET】：JFET（结型场效应管）元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和特性的结型场效应管元件，可以在电路设计时选用。

【Devices-MOS】：MOS（金属氧化物半导体）元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和特性的金属氧化物半导体元件，可以在电路设计时选用。

【Filters-Bandpass】：带通滤波器元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和结构的带通滤波器元件，可以在设计滤波电路系统时选用。

【Filters-Bandstop】：带阻滤波器元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和结构的带阻滤波器元件，可以在设计滤波电路系统时选用。

【Filters-Highpass】：高通滤波器元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和结构的高通滤波器元件，可以在设计滤波电路系统时选用。

【Filters-Lowpass】: 低通滤波器元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型和结构的低通滤波器元件, 可以在设计滤波电路系统时选用。

【System-Mod/Demod】: 调制与解调系统元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的调制与解调元件, 可以在系统设计和仿真时选用。

【System-PLL Components】: 锁相环系统元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的锁相环元件, 可以在系统设计和仿真时选用。

【System-Passive】: 无源的元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的无源元件, 可以在系统设计和仿真时选用。

【System-Switch&Algorithmic】: 开关和运算系统元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的开关和运算元件, 可以在系统设计和仿真时选用。

【System-Amps&Mixer】: 放大器和混频器系统元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的放大器和混频器元件, 可以在系统设计和仿真时选用。

【Tx/Rx Subsystems】: 收发子系统元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的收发子系统元件, 可以在系统设计和仿真时选用。

【Drawing Formats】: 画图格式元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的画图工具。

【Filter DG-All】: 所有滤波器设计向导元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的滤波器设计向导元件, 可以用于指导滤波器的设计。

【Passive Circuit DG-RLC】: RLC 设计向导元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的 RLC 设计向导元件, 可以用于指导 RLC 的设计。

【Smith Chart Matching】: 用于匹配的史密斯圆图元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中只有一个史密斯圆图元件, 可以用于电路的匹配设计。

【Buffer Library】: 缓存元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的缓存元件, 这些元件可以在电路的设计中选用。

【Transistor Bias】: 晶体管偏置电路元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的晶体管偏置电路, 这些可以在电路的设计中选用。

【Impedance Matching】: 阻抗匹配元件列表。这个元件面板列表对应的元件面板中有多种类型的阻抗匹配元件, 这些元件可以在匹配电路的设计中选用。

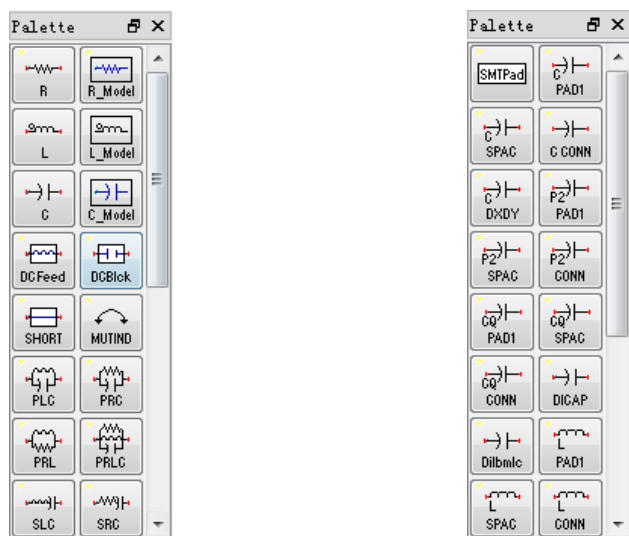
## 2) 元件面板

元件面板将元件分类进行管理, 主要分为集总参数元件、源、仿真控件、传输线和分布参数元件、有源器件、滤波器、系统元件和设计向导等若干类, 便于设计时选用。当选定元件面板列表中的某一项后, 元件面板上显示的元件就随之确定了。下面对元件面板分类加以介绍。

(1) 集总参数元件。在元件面板列表中的【Lumped-Components】和【Lumped-With Artwork】对应的元件面板上可以找到各种集总参数元件。除了这些元件, 面板中还包括各种形式的电阻、电感及电容。用户不仅可以对这些元件的电阻值、电感值和电容值等进行设置, 还可以设置品质因数、温度等参数。这两个元件面板如图 2.35 所示, 其中图 2.35(a)的元件面板上为未封装集总参数元件, 图 2.35(b)的元件面板上为带有封装的集总参数元件。

(2) 源。ADS 包含很多的源, 包括受控源、频域源、调制源、基于数字信号处理的调制源、噪声源和时域源, 主要应用在电路级设计仿真和系统级设计仿真中。它们分布在元件面板列表中的【Sources-Controlled】、【Sources-Fred Domain】、【Sources-Modulated】、【Sources-Modulated-

DSP-Based】、【Sources-Noise】和【Sources-Time Domain】对应的元件面板上。下面将对不同类型的源分别介绍。



(a) 集总参数元件面板

(b) 带有封装的集总参数元件面板

图 2.35 集总参数元件面板

① 受控源元件面板中有电流控电流源 (CCCS)、电流控电压源 (CCVS)、电压控电流源 (VCCS)、电压控电压源 (VCVS)，以及它们在  $Z$  变换域的形式，如图 2.36(a)所示。

② 频域源可以是电压源、电流源或功率源，能产生直流或单频、多频信号，用来分析电路或系统的稳态响应，可以在直流仿真、交流仿真、谐波平衡仿真等多种仿真中采用。在射频电路中，电流源内阻为无穷大，电压源内阻为零，功率源内阻需要设定，一般设定功率源内阻为  $50\Omega$ 。ADS 提供的频域源有直流源 (DC)、交流源 (AC)、单频电压源 (V\_1Tone)、单频电流源 (I\_1Tone)、单频功率源 (P\_1Tone)、多频电压源 (VnTone)、多频电流源 (InTone)、多频功率源 (PnTone) 以及带有相位噪声的本振源等，如图 2.36(b)所示。

③ 调制源可以直接产生许多用户需要的标准调制信号，包括产生 CDMA、GSM 等调制信号，而不需要通过混频器等信号调制模块，所以 ADS 调制源给电路设计带来了极大的方便。ADS 提供的调制源有 CDMA\_IS95\_FWD 源、CDMA\_IS95\_REV 源、CDMA\_ESG\_FWD 源、CDMA\_ESG\_REV 源、DECT 源、GSM 源、NADC 源和 PHS 源等，如图 2.36(c)所示。这些源都是功率源，此外调制源还包括阶跃信号源和脉冲信号源。

(3) 仿真控件。在射频电路的设计中，仿真起着至关重要的作用，它是检验电路设计是否达到要求重要指标。ADS 列出了各种仿真控件，这些仿真控件包括直流仿真控件、交流仿真控件、谐波平衡法仿真控件、S 参数仿真控件、增益压缩仿真控件、大信号 S 参数仿真控件、瞬态仿真控件、工具仿真控件、电路包络仿真控件、预算仿真控件和排序仿真控件，分布在元件面板列表中的【Simulation-DC】、【Simulation-AC】、【Simulation-Transient】、【Simulation-S\_Param】、【Simulation-HB】、【Simulation-LSSP】、【Simulation-Envelope】、【Simulation-XDB】、【Simulation-Instrument】、【Simulation-Budget】和【Simulation-Sequencing】对应的元件面板上。下面将对不同类型的仿真控件分别介绍。

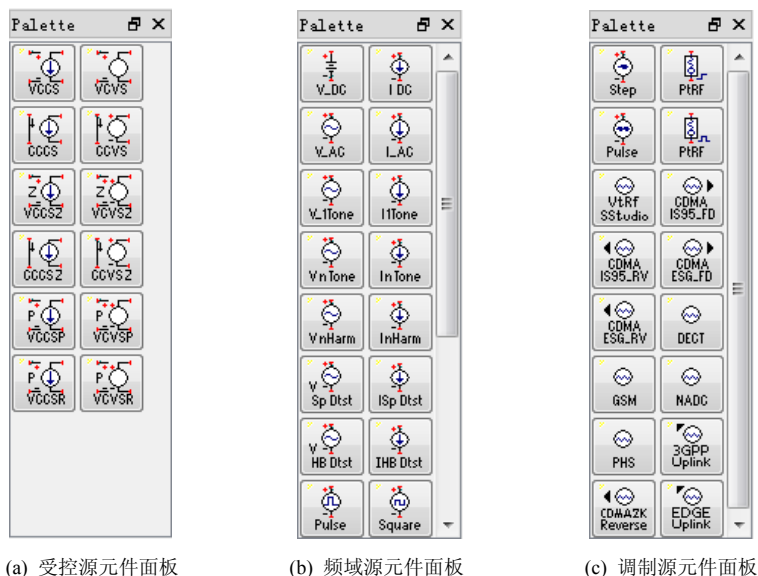


图 2.36 各种源的元件面板

① 直流仿真的主要功能是分析电路的直流工作点，它是所有射频有源电路分析的基础，在执行有源电路交流仿真、S 参数仿真或谐波平衡仿真等其他仿真之前，首先需要进行直流仿真。直流仿真元件面板包括直流仿真控制器、参数扫描计划控制器、参数扫描控制器、节点设置和节点名控件、显示模板控件和仿真测量等式控件，这些面板上的元件经过设置后，既可以提供有源电路单点的直流分析，又可以提供有源电路参数扫描。直流仿真元件面板如图 2.37(a)所示。

② S 参数仿真主要针对线性小信号在频域进行仿真，是射频电路最重要的仿真。S 参数仿真元件面板有反射系数和驻波比控件，噪声功率和噪声系数控件，输入阻抗和输入导纳控件，负载和源稳定性控件，功率增益、电压增益和增益波纹控件，史密斯圆图上的增益圆、稳定圆和噪声圆控件，综合利用 S 参数仿真的各种控件，可以全面分析线性网络的特性。与直流仿真相似，S 参数仿真也有仿真控制器、参数扫描计划控制器、仿真设置控制器、节点设置和节点名控件、参数扫描控制器、显示模板控件和仿真测量等式控件。S 参数仿真元件面板如图 2.37(b)所示。

③ 谐波平衡仿真是在频域内针对非线性电路进行的仿真，用来分析频域信号经过非线性电路后产生谐波和交调的情况。谐波平衡仿真元件面板有频域电流显示控件、频域电压显示控件、功率谱密度显示控件，频率预算控件、增益预算控件、反射系数预算控件、三阶交调预算控件、噪声功率预算控件，输入三阶交调点分析控件、输出三阶交调点分析控件、N 阶截止点分析控件等。与直流仿真相似，谐波平衡仿真也有参数扫描计划控制器、参数扫描控制器、仿真控制器、节点设置和节点名控件、显示模板控件和仿真测量等式控件。谐波平衡仿真元件面板如图 2.37(c)所示。

除直流仿真、S 参数仿真和谐波平衡仿真外，还有交流仿真、大信号 S 参数仿真、增益压缩仿真、电路包络控件、瞬态仿真等，其中交流仿真是在静态工作点附近分析小信号的输入与输出关系，大信号 S 参数仿真用来分析大信号时的 S 参数与增益压缩等，增益压缩仿真主要分析非线性电路增益压缩点的特性，电路包络仿真在时域分析调制信号的包络而在频域分析载波，瞬态仿真在时域分析电路的瞬态特性。



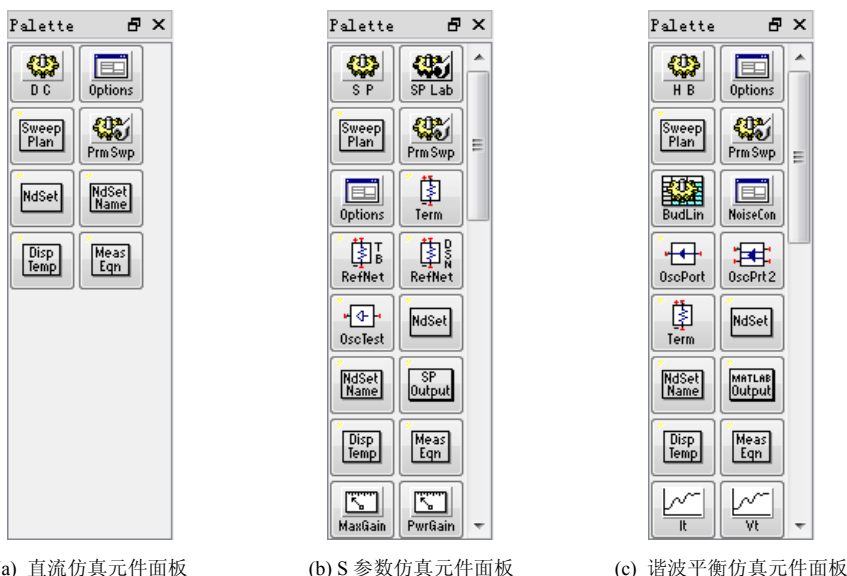


图 2.37 各种仿真的元件面板

(4) 传输线和分布参数元件。在射频电路中，传输线和分布参数元件起着传输信号、连接元件和达到匹配等作用。这些传输线和分布参数元件包括理想传输线元件、微带传输线元件、印刷电路板传输线元件、带状传输线元件、悬置微带传输线元件、鳍线传输线元件、波导传输线元件和多层传输线元件。它们主要分布在元件面板列表中的【TLines-Ideal】、【TLines-Microstrip】、【TLines-Suspended Substrate】、【TLines-Printed Circuit Board】、【TLines-Stripline】、【TLines-Finline】、【TLines-Waveguide】和【TLines-Multilayer】对应的元件面板上。下面将对不同类型的传输线和分布参数元件分别介绍。

① 理想传输线元件是传输线的理想形式，也是通用模型，它们给出了各类理想传输线及分布参数元件的特性阻抗、使用频率和相移等信息。理想传输线元件面板中有理想两端口传输线、理想四端口传输线、理想耦合传输线、理想开路支节、理想短路支节，有给出了媒质参量的两端口传输线、端口传输线、耦合传输线、开路支节、短路支节，还有三端口连接件和渐近线等元件。理想传输线元件面板如图 2.38(a)所示。

② 在设计微带电路时常用的微带传输线及微带线分布参数元件是射频电路中使用最多的元件，这个面板中有各种形状和特性的微带线模型、微带连接件模型和器件模型。微带传输线元件面板中有微带传输线、耦合微带线等传输线模型，有 T 形结和十字结等连接件模型，有开路支节和短路支节等终端器件模型，还有各种适合微带线的电阻、电感和电容。微带传输线元件面板中有 MSUB 选项，MSUB 用来设置微带线基层的参数，只要电路图中使用微带线，MSUB 就一定出现在电路图中。微带传输线元件面板如图 2.38(b)所示。

③ 波导传输线元件面板中有共面波导和金属波导两类元件。使用共面波导元件时，首先需要设置基层，元件面板上的 CPW\_Sub1 用来设置共面波导元件的基层，CPW\_Sub1 的作用与微带线中 MSUB 的作用类似。元件面板上有共面波导传输线、共面波导终端器件和共面波导耦合器件等。元件面板上还有金属波导，这里只有矩形金属波导，包括矩形金属波导传输线和矩形金属波导终端等。波导传输线元件面板如图 2.38(c)所示。

除理想传输线元件面板、微带传输线元件面板和波导传输线元件面板外，还有印刷电路

板传输线元件面板、悬置微带传输线元件面板、鳍线传输线元件面板、带状传输线元件面板和多层传输线元件面板等，这些面板上的传输线都是射频（RF）和微波（MW）波段常用的传输线，也可以由这些传输线构成各种分布参数元件。

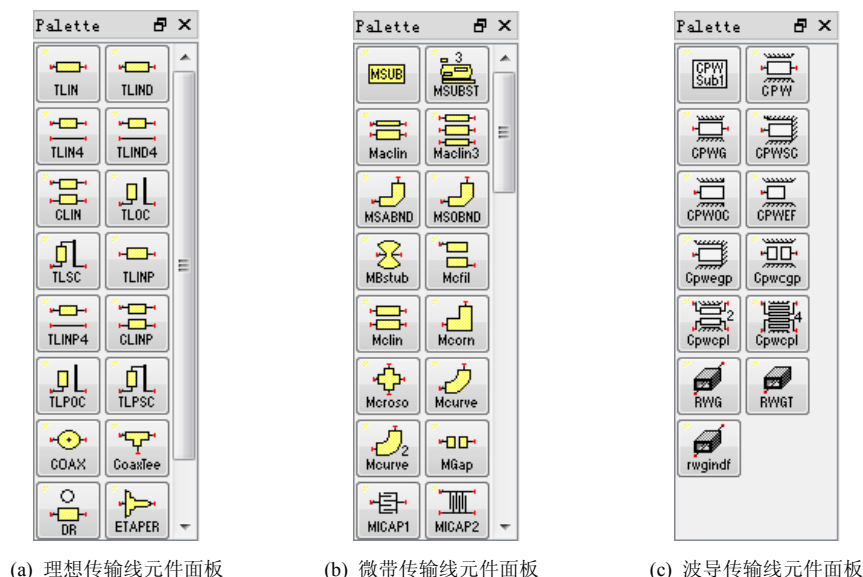


图 2.38 各种传输线的元件面板

（5）有源器件。元件面板列表中的【Devices-Linear】、【Devices-BJT】、【Devices-Diodes】、【Devices-GaAs】、【Devices-JFET】和【Devices-MOS】对应的元件面板上，列出了各种有源元件，这些有源元件包括有源线性元件、BJT（双极结晶体管）元件、二极管元件、GaAs（砷化镓）元件、JFET（结型场效应管）元件和 MOS（金属氧化物半导体）元件。有源器件在射频电路放大器、振荡器和混频器等的设计中起着重要作用。

BJT（双极结）元件是采用最广泛的有源器件之一，其成本低、工作频率高、有高的运行功率容量。双极结晶体管于 1948 年在贝尔实验室发明，自被发明的 60 多年来一直得到改进和提高，在当今 RF 和 MW 的应用中仍然十分重要。双极结晶体管主要有 NPN 型和 PNP 型两类晶体管，ADS 的 BJT 元件面板上有双极结晶体管的模型和多种类型和特性的双极结元件。BJT 元件面板如图 2.39(a)所示。

二极管元件面板中有多种类型和特性的二极管元件，包括 PN 结二极管模型、ADS 二极管模型和 pin 二极管等，这些二极管可以在电路设计时选用。二极管元件面板如图 2.39(b)所示。

JFET（结型场效应管）元件面板中有多种类型和特性的结型场效应管元件，可以在有源电路的设计时选用。JFET 元件面板如图 2.39(c)所示。

除 BJT 元件面板、二极管元件面板和 JFET 元件面板外，还有线性有源元件面板、GaAs 元件面板和 MOS 元件面板。其中 GaAs 元件面板中的砷化镓元件是采用砷化镓材料生产的，在砷化镓元件面板上有各种类型和特性的砷化镓场效应管模型，这些砷化镓元件可以在较高的频率中使用，在射频和微波电路中应用十分广泛。

（6）滤波器。元件面板列表中的【Filters-Bandpass】、【Filters-Bandstop】、【TLines-Printed Circuit Board】、【Filters-Highpass】和【Filters-Lowpass】对应的元件面板上，列出了各种滤波



器元件，这些滤波器元件包括带通滤波器元件、带阻滤波器元件、高通滤波器元件和低通滤波器元件，这些滤波器元件可以在系统级设计时选用。

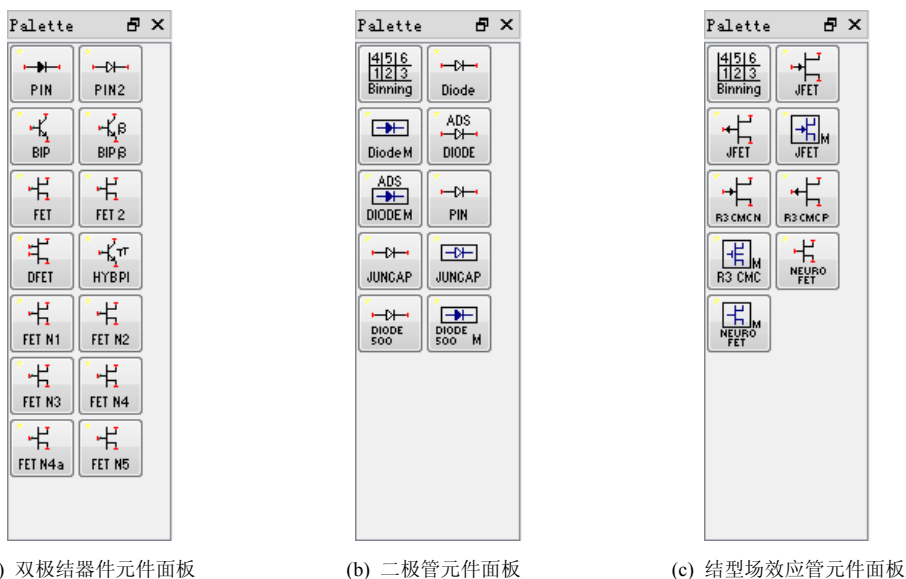


图 2.39 各种有源器件的元件面板

带通滤波器元件面板中有多种类型的带通滤波器元件，这些元件包括巴特沃兹带通滤波器、切比雪夫带通滤波器、椭圆带通滤波器、贝塞尔带通滤波器、高斯带通滤波器和升余弦带通滤波器等，这些滤波器在系统级设计中使用，可以设置滤波器的中心频率和带宽等。带通滤波器元件面板如图 2.40(a)所示。

带阻滤波器元件面板、高通滤波器元件面板和低通滤波器元件面板中的元件同样可以在系统级设计中使用，每个面板中同样包括巴特沃兹滤波器、切比雪夫滤波器、椭圆滤波器、贝塞尔滤波器、高斯滤波器和升余弦滤波器等。带阻滤波器元件面板如图 2.40(b)所示，高通滤波器元件面板如图 2.40(c)所示。

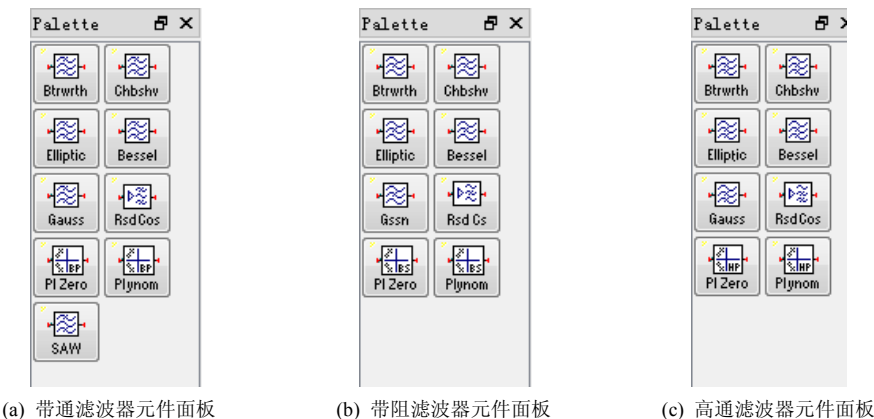


图 2.40 各种滤波器的元件面板

(7) 系统元件。元件面板列表中的【System-Mod/Demod】、【System-PLL components】、【System-Passive】、【System-Switch&Algorithmic】、【System-Amps&Mixer】、【System-Data

Models】和【Tx/Rx Subsystems】对应的元件面板上，列出了各种系统元件，这些系统元件包括调制与解调系统元件、锁相环系统元件、无源器件系统元件、开关和运算系统元件、放大器和混频器系统元件、数据文件模型系统元件和收发子系统元件，这些元件可以在系统级设计时选用。

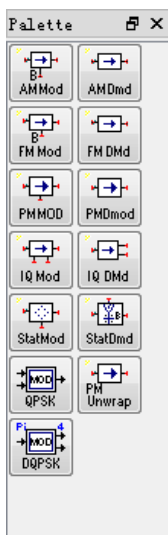
调制与解调系统元件面板中有多种类型的调制与解调元件，这些元件可以在系统级设计时选用。调制与解调系统元件面板中包含幅度调制和解调、频率调制和解调、相位调制和解调、IQ 调制和解调、QPSK 调制和 DQPSK 调制等。调制与解调系统元件面板如图 2.41(a)所示。

锁相环系统元件面板中有多种类型的锁相环元件，可以在系统设计和仿真时选用。锁相环系统元件面板如图 2.41(b)所示。

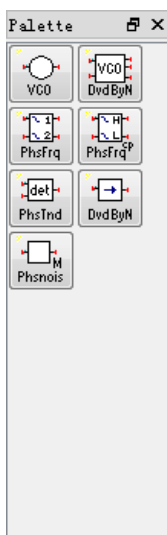
放大器和混频器系统元件面板中有多种类型的放大器和混频器元件，可以在系统设计和仿真时选用。放大器和混频器系统元件面板如图 2.41(c)所示。

此外还有无源的系统元件面板、开关和运算系统元件面板、数据文件模型系统元件面板和收发子系统元件面板，其中无源的系统元件面板中有多种类型的无源系统元件，包括各种耦合器、功率分配器、平衡器、隔离器、连接件和天线等。

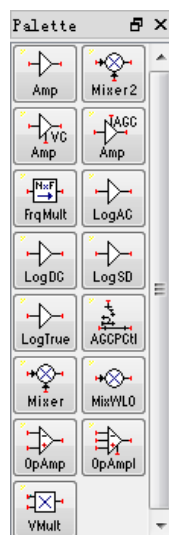
此外还有阻抗匹配和史密斯圆图设计向导元件面板。阻抗匹配设计向导元件面板上包含单支节匹配、双支节匹配、四分之一波长阻抗匹配和渐近线匹配等元件，这些元件在阻抗匹配中经常使用。史密斯圆图设计向导元件面板上只有史密斯圆图一个元件，但史密斯圆图在射频微波电路中使用十分广泛，可以涉及输入阻抗、反射系数、驻波系数和 Q 值等的计算，并在阻抗匹配中有着十分重要的位置。



(a) 调制与解调系统元件面板



(b) 锁相环系统元件面板



(c) 放大器和混频器系统元件面板

图 2.41 各种系统元件的元件面板

### 2.2.3 布局图界面

布局图视窗用来进行布局图的设计、编辑与仿真，电路图在原理图视窗中设计完成后，需要转到布局图视窗，完成相应电路的版图设计，版图设计更符合电路所处的实际环境，ADS 软件采用矩量法对电路板图进行电磁仿真分析。

ADS 软件在采用矩量法对电路板图进行电磁仿真时，将板图分割成若干个部分，分割的

数量越多，电磁仿真的数值结果就越精确。由于板图的仿真方法与原理图的仿真方法不同，因此电路由原理图转换到版图后，仿真的结果就有差异，在原理图中设计完成的电路，到板图中需要修改。

布局图视窗的工作界面包括标题栏、菜单栏、工具栏、元件面板列表、元件面板、历史元件列表、参数列表、画图区和状态栏几部分，如图 2.42 所示。布局图视窗的界面与原理图视窗的界面基本一致，使用方法也基本相同，因此对布局图视窗就不再介绍了。

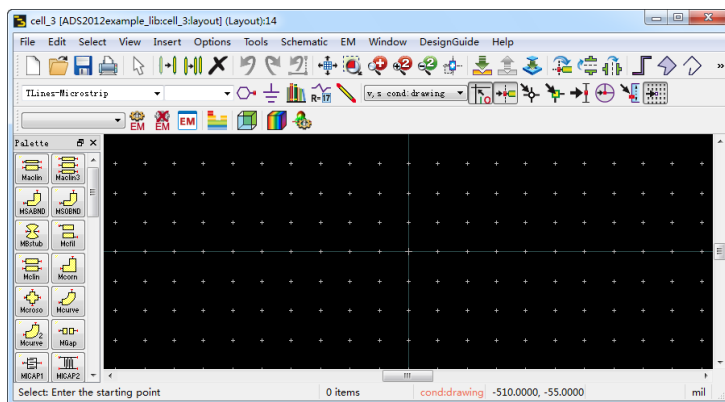


图 2.42 布局图视窗的工作界面

## 2.2.4 数据显示界面

电路在原理图视窗和布局图视窗仿真后，仿真结果可以在数据显示视窗显示出来。数据显示视窗有多种方法显示仿真结果，包括用图形显示仿真结果和用数据列表显示仿真结果等，其中图形显示的方法又包括在直角坐标系显示、在极坐标系显示和在史密斯圆图上显示等。当仿真结果显示出来后，数据显示视窗还提供多种方式读取数据，并允许使用方程式对数据进行处理。

下面分别介绍数据显示视窗中的工作界面、菜单栏、工具栏和数据显示方法等，以帮助熟悉数据显示视窗的工作环境。

### 1. 工作界面

数据显示视窗的工作界面包括标题栏、菜单栏、工具栏、数据来源列表、数据显示方式面板和数据显示区几部分，如图 2.43 所示。

工作界面中的标题栏标明了视窗的类型、电路名称和打开窗口编号，标题栏中的【Data Display】表示这个视窗为 ADS 的数据显示视窗。

工作界面中的数据来源列表列出了需要绘制图形和显示数据的所有数据来源，可以针对需要显示的数据内容选择数据来源。

用户可以使用工作界面上的菜单栏、工具栏和数据显示方式面板在数据显示区上创建和显示仿真结果，并可以读取相关数据。

### 2. 菜单栏

数据显示视窗中的菜单栏包含了用户在数据显示视窗中的可执行操作。菜单栏中有【File】、【Edit】、【View】、【Insert】、【Marker】、【History】、【Options】、【Tools】、【Page】、【Window】和【Help】下拉菜单，下面分别加以介绍。

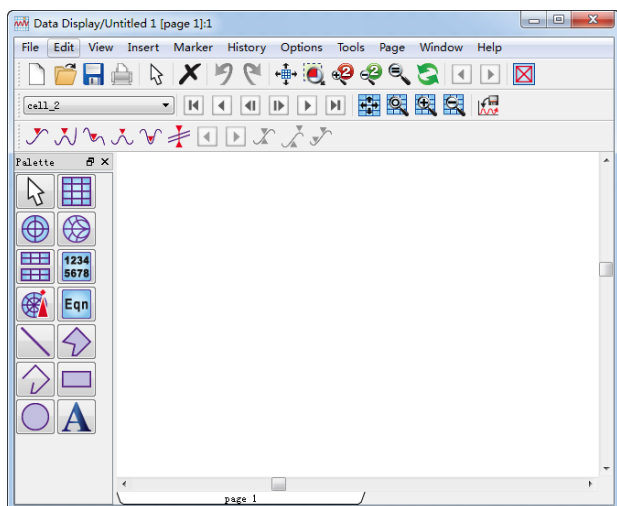


图 2.43 数据显示视窗的工作界面

【File】菜单：菜单中包含了与数据显示文件相关的操作，包括新建数据显示图、打开已经存在的数据显示图、关闭数据显示图、保存数据显示图、将数据显示图保存为模板形式、导出文件、设置打印参数和退出 ADS 软件等。

【Edit】菜单：菜单中包含了与视窗中数据或图形的编辑相关的操作，包括结束命令、剪切数据或图形、复制数据或图形、粘贴数据或图形、全选视图、数据或图形分组或取消分组、调整数据顺序和添加文本等。

【View】菜单：菜单中包含了与视图外观和显示相关的操作，包括显示全部视图、显示部分视图、隐藏视图、放大视图、缩小视图和显示工具栏等。

【Insert】菜单：菜单中包含了与插入相关的操作，包括插入曲线、插入方程、插入直线、插入圆、插入矩形和插入文字等。

【Marker】菜单：菜单中包含了在曲线上插入标记的相关操作，包括插入一个新标记、在峰值插入标记和在谷值插入标记等。

【History】菜单：菜单中显示了各个操作的历史，包括开始、暂停和停止数据的显示。

【Page】菜单：菜单中包含了与数据显示窗口页相关的操作，包括打开一个新显示页、重新命名一个显示页和删除一个显示页等。

【Options】菜单：菜单中包含了在数据显示视窗进行基本设置的操作，包括设置热键、设置工具栏和设置参数等。

【Tools】菜单：菜单中包含了数据显示视窗中常用的工具。

【Window】菜单：菜单中包含了新建和关闭数据显示窗口的操作。

【Help】菜单：菜单中包含了与帮助相关的操作，包括帮助选项、主题索引、agilent 网络资料信息和 ADS 版本信息等。

### 3. 工具栏

数据显示视窗的工具栏包括了一些按钮，这些按钮是菜单栏中一些常用的菜单项，可以为电路图的设计提供便利操作。ADS 软件默认的工具栏有多个快捷按钮，除工具栏上默认的快捷按钮外，还可以通过菜单【Options】→【Hot Key/Toolbar Configuration】增加、减少工具

栏中的快捷按钮。如果在数据显示视窗不想看到工具栏，可以通过选择【View】→【Toolbar】选项在数据显示视窗隐藏工具栏。数据显示视窗的工具栏如图 2.44 所示。

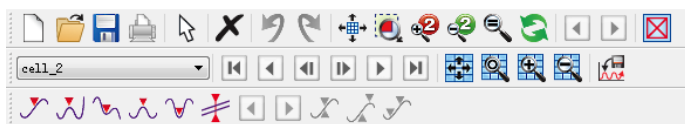


图 2.44 数据显示视窗的工具栏

数据显示视窗的工具栏有多种按钮，这多种按钮分述如下。
























(1) 针对文件的操作按钮，如创建数据显示图按钮、打开已经存在的数据显示图按钮和保存数据显示图按钮等。


(2) 针对编辑的操作按钮，如结束命令按钮、复制按钮、删除按钮和全选按钮等。


(3) 针对数据显示图外观的操作按钮，如观看全部数据显示图按钮、放大数据显示图按钮和缩小数据显示图按钮等。


(4) 针对插入的操作按钮，如插入方程和图形按钮等。


下面分别介绍数据显示视窗中工具栏快捷按钮的名称和功能，按图 2.44 中的按钮顺序从左到右进行介绍。


- ：打开一个新的数据显示视窗。
- ：打开一个已经存在的数据显示视窗。
- ：保存当前数据显示视窗的数据。
- ：打印当前数据显示视窗的内容。
- ：结束当前命令。
- ：删除选中内容。
- ：撤销上一步操作。
- ：恢复上一次撤销操作。
- ：查看数据显示视窗的全部内容。
- ：将数据显示视窗指定区域的视图放大。
- ：将数据显示视窗的视图放大至两倍。
- ：将数据显示视窗的视图缩小为 1/2。
- ：以实际尺寸观察视图。
- ：重新绘制图形显示区的内容。
- ：查看上一页内容。
- ：查看下一页内容。
- ：使对象失效或使对象恢复有效。
- ：在数据列表显示方式中使用，显示最始端数据。
- ：在数据列表显示方式中使用，显示前一页数据。
- ：在数据列表显示方式中使用，显示前一行数据。
- ：在数据列表显示方式中使用，显示后一行数据。
- ：在数据列表显示方式中使用，显示最后一页数据。
- ：在数据列表显示方式中使用，显示最后端数据。
- ：自动调整一个矩形框内的图像尺寸。


: 放大一个矩形框内某一特定范围的尺寸。


: 放大一个矩形框内图形的尺寸。

: 缩小一个矩形框内图形的尺寸。


: 执行数据文件工具。

: 在图形中插入一个标记。

: 在图形的峰值插入一个标记。

: 在图形的谷值插入一个标记。


: 在图形的最大点插入一个标记。


: 在图形的最小点插入一个标记。

: 在图形中插入一个线段标记。

: 由当前标记点向前一个标记点移动。

: 由当前标记点向后一个标记点移动。

: 打开标记差值模式。

: 打开标记偏置模式。

: 取消标记差值或偏置模式。

#### 4. 数据显示方式

计算和仿真得到的数据在数据显示视窗的数据显示区可以显示出来, 数据显示方式面板提供了多种显示方式。下面分别介绍数据显示方式面板和数据显示区的显示结果。

##### (1) 数据显示方式面板

数据显示方式面板如图 2.45 所示。

下面分别介绍数据显示方式面板中按钮的名称和功能, 按图 2.45 中的按钮顺序从左到右进行介绍。















- : 结束当前命令。
- : 在数据显示区创建一个直角坐标系的矩形图。
- : 在数据显示区创建一个极坐标系图。
- : 在数据显示区创建一个史密斯圆图。
- : 在数据显示区创建多个直角坐标系的矩形图。
- : 在数据显示区创建一个数据列表。
- : 在数据显示区创建一个天线点。
- : 在数据显示区创建一个方程等式。
- : 在数据显示区绘制线条的工具。
- : 在数据显示区绘制多边形的工具。
- : 在数据显示区绘制折线的工具。
- : 在数据显示区绘制一个矩形。
- : 在数据显示区绘制一个圆。
- : 在数据显示区添加文本。



图 2.45 数据显示方式面板

##### (2) 数据显示区的数据显示

当选定了数据显示方式面板上的某一显示方式后, 数据显示区以图形或列表的方式显示数据。下面以某网络的参数为例, 给出数字显示区的显示结果, 显示结果如图 2.46 所示。



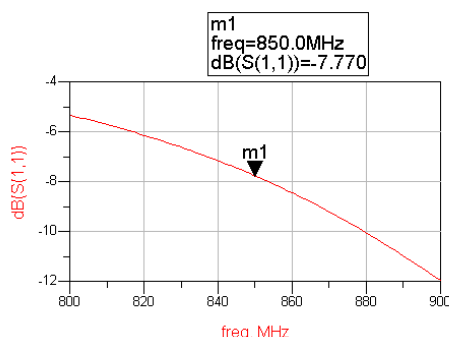
图 2.46 给出了 4 种显示方式, 分别为数据列表显示方式、直角坐标系显示方式、极坐标系显示方式和史密斯圆图显示方式, 并在直角坐标系、极坐标系和史密斯圆图这 3 种显示方式上插入了标记, 通过标记可以清楚地看到在 850MHz 时不同显示方式上的数据表示方法, 下面对数据显示方法说明如下。

- ① 在数据列表显示方式中, 不同频率的用模值和相角表示, 如图 2.46(a)所示。
- ② 在直角坐标系显示方式中, 不同频率用 dB (分贝) 表示, 如图 2.46(b)所示。
- ③ 在极坐标系显示方式中, 不同频率的用模值和相角表示, 如图 2.46(c)所示。
- ④ 在史密斯圆图显示方式中, 不同频率的用模值和相角表示, 并给出了输入阻抗的值, 如图 2.46(d)所示。

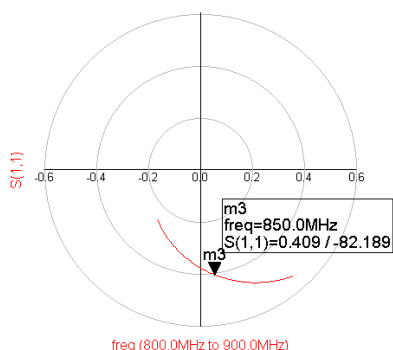
数据在数据显示区中除上述表示方法外, ADS 软件还提供了其他显示方法, 其他显示方法可以在数据显示方式面板上查找, 这里就不再介绍了。

freq	S(1,1)
800.0 MHz	0.541 / -49.159
801.0 MHz	0.539 / -49.752
802.0 MHz	0.537 / -50.346
803.0 MHz	0.535 / -50.943
804.0 MHz	0.532 / -51.542
805.0 MHz	0.530 / -52.143
806.0 MHz	0.528 / -52.746
807.0 MHz	0.525 / -53.352
808.0 MHz	0.523 / -53.960
809.0 MHz	0.520 / -54.570
810.0 MHz	0.518 / -55.182
811.0 MHz	0.516 / -55.797
812.0 MHz	0.513 / -56.414
813.0 MHz	0.511 / -57.034
814.0 MHz	0.508 / -57.656
815.0 MHz	0.506 / -58.281
816.0 MHz	0.503 / -58.908
817.0 MHz	0.501 / -59.538
818.0 MHz	0.498 / -60.170
819.0 MHz	0.496 / -60.806
820.0 MHz	0.493 / -61.444
821.0 MHz	0.490 / -62.085
822.0 MHz	0.488 / -62.729
823.0 MHz	0.486 / -63.375
824.0 MHz	0.483 / -64.025
825.0 MHz	0.480 / -64.678
826.0 MHz	0.477 / -65.334
827.0 MHz	0.475 / -65.993
828.0 MHz	0.472 / -66.655
829.0 MHz	0.469 / -67.321

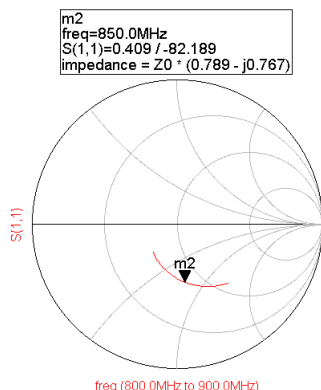
(a) 数据列表显示方式



(b) 直角坐标系显示方式



(c) 极坐标系显示方式



(d) 史密斯圆图显示方式

图 2.46 数据显示区的显示结果

## 习题

1. 本章主要内容是 ADS 2012 软件的简介, 请简述该软件的主要功能。
2. 查阅相关资料, 并结合实际操作, 对软件进行了解和初步学习。
3. ADS 界面中的原理图界面、布局图界面和数据显示界面层次之间有什么样的联系?

## 第3章 ADS 设计向导

打开或创建一个项目，该项目包含电路原理图、布局图、仿真分析和数据结果显示，ADS 基本操作是在一个项目中完成的。

本章主要介绍 ADS 软件的基本操作，其中主要有怎样创建或打开项目，如何在项目中创建或打开原理图，在原理图上搭建电路，将原理图仿真并显示仿真结果，将原理图电路调谐或优化，得到原理图的成品率分析，以及利用设计向导得到原理图设计等，这些操作构成了 ADS 软件的基础操作，用来完成目标任务。

### 3.1 设计流程

本节将创建一个项目，本章后续所有的工作都将在本节创建的项目中完成。在这个项目中，本节会创建集总参数低通滤波器和带通滤波器两个原理图，并在该图中搭建电路，完成原理图的设计工作。

#### 3.1.1 新建项目

使用主视窗创建项目，这个项目的名称暂定为 LC，项目存放目录为“D:\Users\lp\”。项目创建完成后，ADS 主视窗如图 3.1 所示。

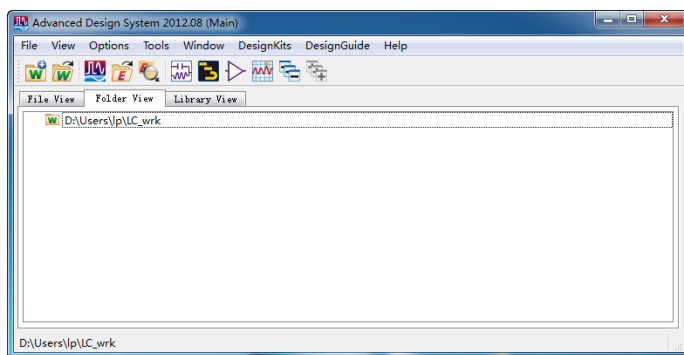


图 3.1 ADS 主视窗

#### 3.1.2 工程实例设计

##### 1. 集总参数低通滤波器

###### 1) 创建集总参数低通滤波器原理图

有许多种方法可以创建原理图，这里介绍创建原理图的一种方法，该原理图的名称暂时定为 LCLowpassFilter（集总参数低通滤波器）。

选择主视窗中的【File】→【New】→【Schematic】选项，弹出【New Schematic】对话框，在【New Schematic】对话框中，做如下设置。



- (1) 输入新设计的名称“LCLowpassFilter”。
- (2) 选择新设计视窗为“Schematic”。
- (3) 选择“Schematic Design Templates”(原理图设计模板)为“none”。



完成设置的【New Schematic】对话框,如图 3.2 所示,单击【OK】按钮,就完成了创建原理图 LCLowpassFilter 的工作。

## 2) 搭建原理图的步骤

在原理图上搭建电路,要用到面板上的多个元件,将它们插入原理图的画图区,用导线连接起来,就构成原理图电路。用元件搭建原理图电路的基本步骤如下。


(1) 选择元件所在的面板列表。如果元件面板列表的内容发生改变,元件面板上的元件也会随之而变。


(2) 在元件面板上选择需要的元件。



(3) 使用工具栏中的工具,将选中的元件旋转或镜像等,使其适合电路设计的需要。

(4) 将元件放置在原理图的画图区。

(5) 单击工具栏中的按钮,结束当前命令。

(6) 选中元件,单击工具栏中的按钮,设置元件参数。

(7) 在画图区放置多个元件后,单击工具栏中的按钮,将元件连接起来。需要说明的是,将元件连接起来的导线在电路中不计长度。

在上面的设计过程中,如果哪次操作出现错误,可以单击工具栏中的按钮,将操作取消,按几次按钮就取消几次操作。

## 3) 设计集总参数低通滤波器原理图

下面按图 3.3 的步骤搭建集总参数低通滤波器原理图。

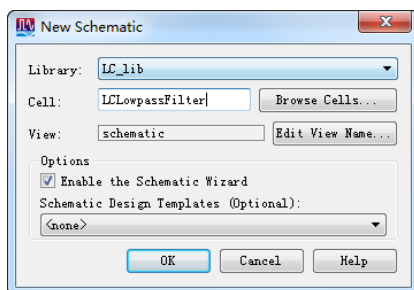


图 3.2 创建一个新设计

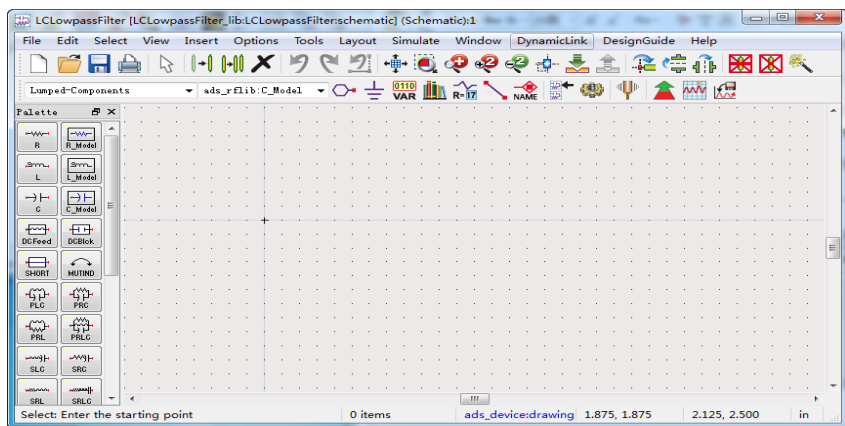




图 3.3 搭建原理图的面板

(1) 在原理图的元件面板列表上,选择集总参数元件【Lumped-Components】项,元件面板上出现与集总参数对应的图标,如图 3.4 所示。

(2) 在图 3.4 所示的元件面板上,单击【C】图标选择集总参数电容,然后单击工具栏中的旋转按钮,将电容旋转 90°,再单击画图区将电容插入到原理图的画图区。单击工具栏中的按钮,结束当前命令。

(3) 在画图区选中电容元件，然后单击工具栏中的  按钮，这时弹出【Capacitor】设置对话框，在对话框中对电容的参数设置如下。

①  $C=2.0\text{pF}$ ，表示设置电容为  $2.0\text{pF}$ 。

② 其余的参数保持默认状态。

完成设置的【Capacitor】对话框如图 3.5 所示。

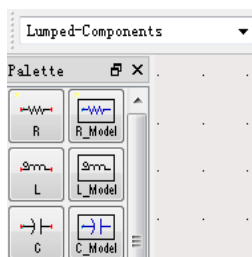


图 3.4 集总参数元件面板

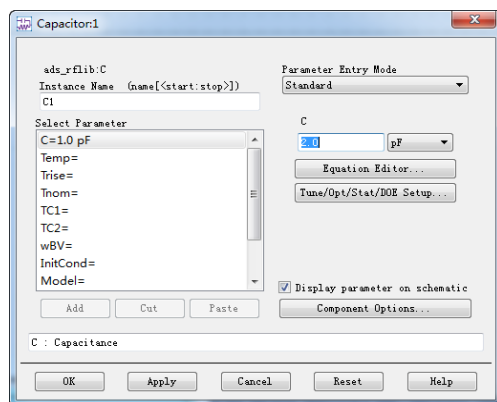









图 3.5 电容参数设置对话框

(4) 单击该对话框中的【OK】按钮，关闭【Capacitor】对话框。原理图中设置完成的电容如图 3.6 所示。

(5) 在图 3.4 所示的元件面板上，单击【L】图标选择集总参数电感，再单击画图区将电感插入到原理图的画图区。单击工具栏中的  按钮，结束当前命令。电感采用默认设置。

(6) 在图 3.4 所示的元件面板上，单击【C】图标选择集总参数电容，然后单击工具栏中的  按钮，将电容旋转  $90^\circ$ ，插入原理图的画图区。单击工具栏中的  按钮，结束当前命令。下面采用设置电容值的另一种方式，在画图区选中电容元件，然后将鼠标放在电容的数值上，这时电容被选中，数值变蓝，可以将变蓝的数值改为  $2.0\text{pF}$ ，表示设置电容为  $2.0\text{pF}$ 。

(7) 单击工具栏中的  按钮，将“地”两次插入画图区，让电容接地。单击工具栏中的  按钮，将原理图中的电容和电感连接起来，完成集总参数低通滤波器原理图的设计。集总参数低通滤波器原理图如图 3.7 所示。

(8) 在(1)~(7)的设计过程中，如果哪一次操作出现错误，可以单击工具栏中的  按钮，将其撤销。如果前面操作没有出错，单击工具栏中的  按钮，保存设计。

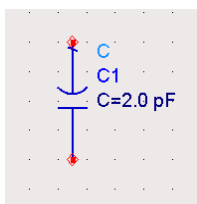


图 3.6 原理图中设置完成的电容

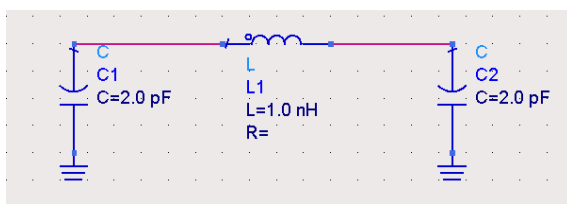


图 3.7 集总参数低通滤波器原理图

## 2. 集总参数带通滤波器


前面创建并设计了集总参数低通滤波器 LCLowpassFilter 原理图，下面再新建集总参数带通滤波器 LCBandpassFilter 原理图。

### 1) 另存原理图

在原理图 LCLowpassFilter 上, 选择【File】→【Save As】选项, 弹出【Save Design As】对话框, 在【Save Design As】对话框中, 输入文件名 LCBandpassFilter, 然后单击【保存】按钮, 将原理图另存为 LCBandpassFilter。【Save Design As】对话框如图 3.8 所示。

### 2) 设计集总参数带通滤波器原理图

另存原理图之后, LCBandpassFilter 原理图与集总参数低通滤波器 LCLowpassFilter 原理图内容是一样的, 只是文件名发生改变。下面修改 LCBandpassFilter 原理图, 使其成为集总参数带通滤波器原理图。

(1) 在 LCBandpassFilter 原理图上, 单击工具栏的  按钮, 然后分别单击画图区的两个电容、两个“地”和两个导线, 将其原理图中画图区的两个电容、两个“地”和两个导线删掉。


(2) 在集总参数元件面板上, 单击【C】图标选择集总参数电容, 然后单击画图区, 将电容插入原理图的画图区。

(3) 在原理图的画图区, 双击电容元件, 这时弹出【Capacitor】设置对话框, 在窗口中对电容的参数设置如下。

①  $C=1\text{pF}$ , 表示设置电容为  $1\text{pF}$ 。

② 其余的参数保持默认状态。

单击【OK】按钮, 关闭【Capacitor】设置对话框。这已经是介绍的第三种设置电容值的方法, 所介绍的每一种设置方法也可以用于设置其他元件的值。

(4) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的电容和电感连接起来, 完成集总参数带通滤波器原理图的设计工作。集总参数带通滤波器原理图如图 3.9 所示。

(5) 单击工具栏中的  按钮, 保存设计。

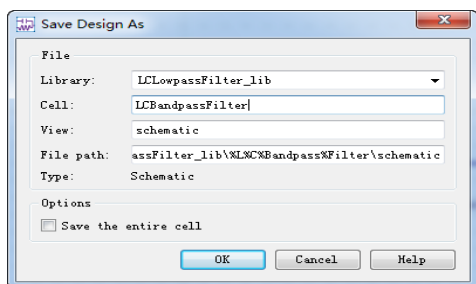


图 3.8 另存原理图

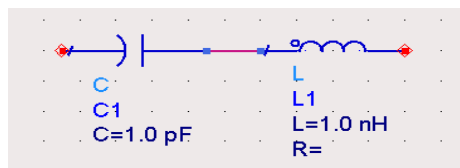


图 3.9 集总参数带通滤波器原理图

## 3.1.3 工程实例分析

新建并设计了集总参数低通滤波器原理图和集总参数带通滤波器原理图, 本节将对集总参数低通滤波器原理图进行介绍, 并在数据显示视窗中出仿真结果。

### 1. 设置仿真控件与原理图仿真

下面将打开集总参数低通滤波器 LCLowpassFilter 原理图, 然后在原理图中添加电路的终端负载, 并设置 S 参数仿真控件, 对原理图仿真。

#### 1) 打开集总参数低通滤波器 LCLowpassFilter 原理图

下面在主视窗打开 LCLowpassFilter 原理图。在主视窗打开 LCLowpassFilter 原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。

(2) 在主视窗的项目浏览区，双击【LCLowpassFilter】，可以看到当前项目 LC 下所有的电路设计，这时主视窗如图 3.10 所示。

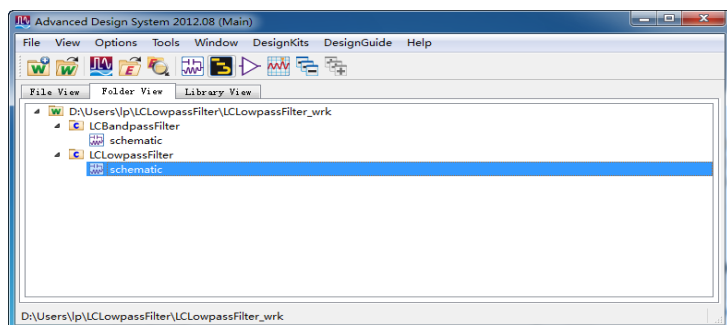


图 3.10 由主视窗进入一个设计

(3) 双击主视窗中项目浏览区的 LCLowpassFilter 设计下的【schematic】，可以进入 LCLowpassFilter 原理图。

## 2) 仿真控件设置

上面设计的滤波器，必须在输入和输出端加上负载终端，才能进行 S 参数仿真。下面在集总参数低通滤波器 LCLowpassFilter 的原理图中，插入负载终端、“地”和 S 参数仿真控件，并设置 S 参数仿真控件，然后对原理图仿真。

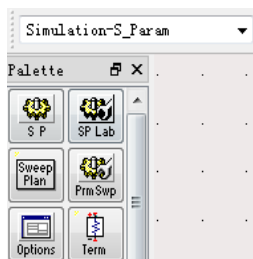



图 3.11 S 参数仿真面板

(1) 在原理图的元件面板列表上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标，如图 3.11 所示。

(2) 在图 3.11 所示的 S 参数仿真元件面板上，选择负载终端【Term】项，两次插入到原理图中，定义负载终端 Term1 为输入端口，负载终端 Term2 为输出端口。

(3) 在原理图工具栏中单击“地线”按钮，将地线两次插入原理图，让负载终端 Term1 和 Term2 接地。

(4) 单击工具栏中的  按钮，将原理图中的负载终端 Term 和低通滤波器连接起来，连接方式如图 3.12 所示。

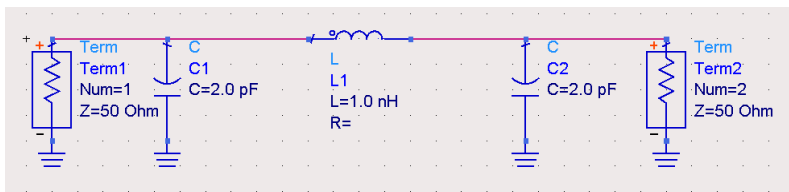


图 3.12 添加了终端的集总参数低通滤波器原理图

(5) 在 S 参数仿真元件面板上，选择 S 参数仿真控件 SP，插入到原理图画图区。双击画图区中的 S 参数仿真控件 SP，弹出【Scattering-Parameter Simulation】设置对话框，在该对话框中对 S 参数仿真控件设置如下。

① 频率扫描类型选为线性 Linear。

- ② 频率扫描的起始值设为 0GHz。
- ③ 频率扫描的终止值设为 10GHz。
- ④ 频率扫描的步长设为 0.1GHz。
- ⑤ 其余的参数保持默认状态。

当上面设置完成后，S 参数仿真控件设置窗口中的“Num. of pts.”自动显示为“101”，意味着如果频率从 0GHz 扫描到 10GHz，扫描步长是 0.1GHz，共需扫描 101 个点。S 参数仿真控件设置对话框如图 3.13 所示，“Num. of pts.”代表扫描点数。

(6) 单击【OK】按钮，完成对 S 参数仿真控件的设置。原理图中设置完成的 S 参数仿真控件如图 3.14 所示。

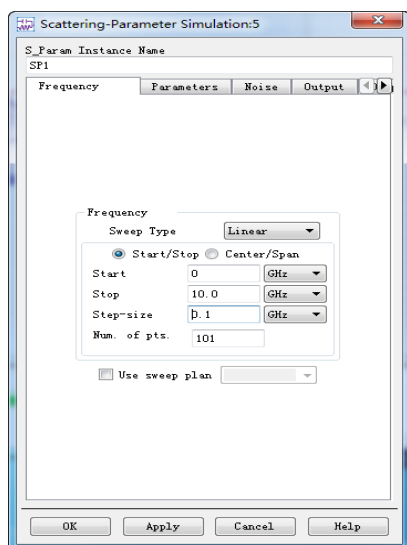


图 3.13 S 参数仿真控件设置对话框

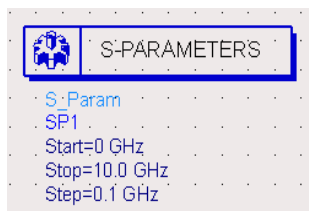


图 3.14 S 参数仿真控件

现在用于仿真的集总参数低通滤波器原理图如图 3.15 所示。

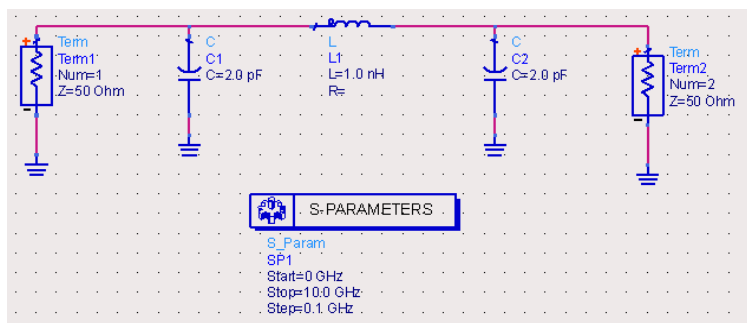



图 3.15 用于仿真的集总参数低通滤波器原理图

### 3) 原理图仿真

(1) 现在可以对图 3.15 所示的原理图仿真了。在原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真，在该过程中弹出了仿真状态窗口，该窗口记录了频率扫描范围和仿真花费的时间等。仿真状态窗口如图 3.16 所示。

(2) 仿真结束后，数据显示视窗自动弹出。

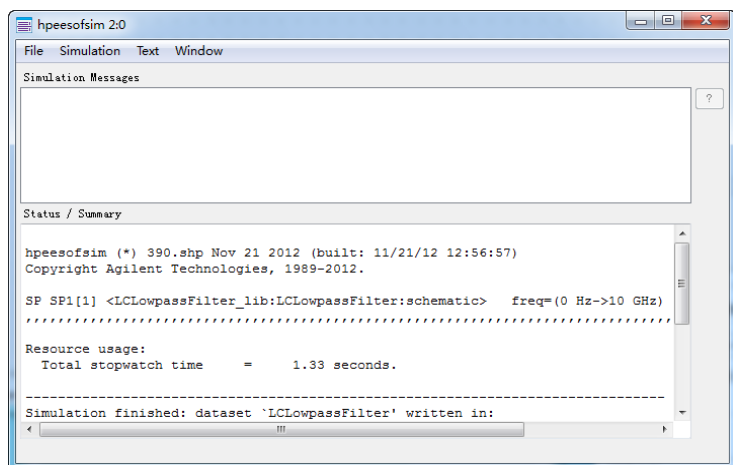


图 3.16 仿真状态窗口

## 2. 在数据显示窗口显示仿真结果

### 1) 在数据显示窗口显示仿真结果的步骤

(1) 如果采用模板创建原理图，当原理图仿真结束后，数据显示视窗会自动显示仿真结果，仿真结果显示的方式是模板设定好的。

(2) 如果用户不采用模板创建原理图，当原理图仿真结束后，数据显示视窗不会显示任何数据，用户需要自己选择数据显示方式，将仿真结果显示出来。LCLowpassFilter 原理图没有采用模板，所以数据显示方式由用户自己确定。


### 2) 在数据显示窗口显示低通滤波器 LCLowpassFilter 的仿真结果

下面在数据显示视窗显示 LCLowpassFilter 仿真结果。


(1) 仿真结束后，数据显示视窗自动弹出，在数据显示视窗中可以看到 LCLowpassFilter 名称，这个名称与原理图的名称相同，此时数据显示视窗没有显示任何数据。

(2) 单击数据显示方式面板中的矩形图标，然后移动鼠标到数据显示区，再次单击就可以创建矩形图形显示，这时会弹出【Plot Trace & Attributes】对话框。

(3) 在【Plot Trace & Attributes】对话框中选择绘制曲线的变量，这里选择 S(2, 1)，然后单击【Add】按钮，这时又会弹出【Complex Data】对话框。选中【dB】复选框，单击【OK】按钮关闭这个对话框。再单击【Plot Trace & Attributes】对话框中的【OK】按钮，也关闭这个对话框。【Plot Trace & Attributes】和【Complex Data】对话框如图 3.17 所示。

(4) 当【Plot Trace & Attributes】和【Complex Data】对话框关闭后，在数据显示视窗用矩形图表示的 S21 曲线会自动出现，单击数据显示视窗工具栏中的  按钮，可以观看到全部视图，如图 3.18 所示。图 3.18 中矩形图的横轴为频率，由于 S 参数仿真控件的起始值和终止值分别为 0GHz 和 10GHz，所以横轴的频率范围为 0~10GHz。矩形图的纵轴为 S21 由于在【Complex Data】对话框中选中了【dB】复选框，所以 S21 是用分贝 (dB) 表示的。

(5) S21 表示信号由端口 1 到端口 2 的正向传输系数，由图 3.18 可以看出在频率低时信号的正向传输衰减很小，在频率高时信号的正向传输衰减很大，因此这是一个低通滤波器。

(6) 单击数据显示视窗工具栏中的  按钮，保存 S21 数据。

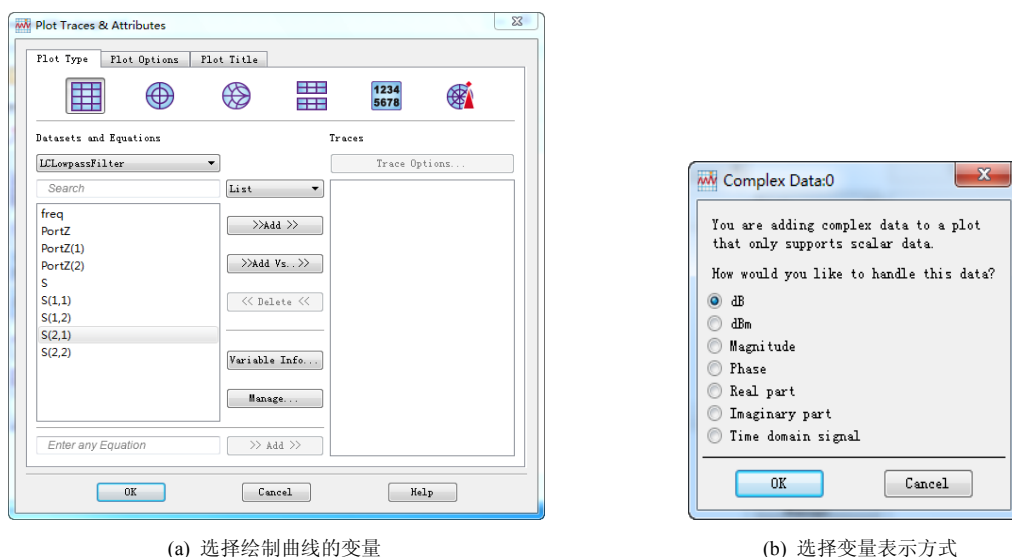


图 3.17 曲线设置窗口

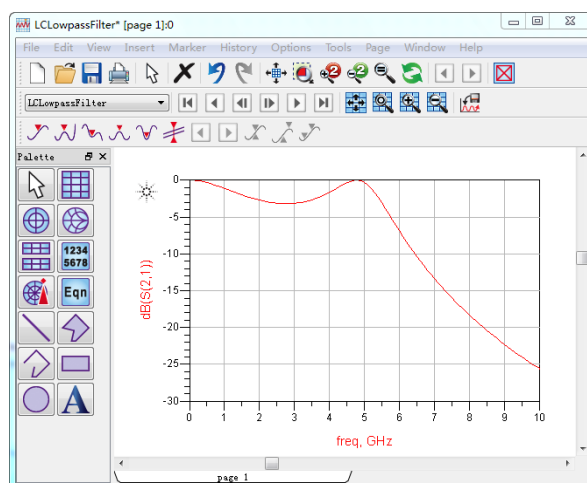


图 3.18 低通滤波器数据显示视窗

## 3.2 原理图优化与分析

原理图优化与分析即调谐与优化，是 ADS 软件的辅助仿真工具。调谐是手动完成的，通过手动改变元件的值，来达到改变仿真结果的目的。优化是软件自动完成的，当给出优化目标后，软件会自动给出优化结果。本节主要介绍原理图调谐与优化的操作方法。

### 3.2.1 原理图优化

这里将采用上节中集总参数低通滤波器的原理（图 3.15）来介绍调谐的操作方法。对电路调谐就是改变电路的谐振点，这依靠改变滤波器中的电容和电感值来完成。调谐的最大好处在于，当电容和电感值改变时，可以在数据显示视窗观看到滤波器正向传输系数  $S_{21}$  的连续变化情况，这对了解滤波器的特性是非常有益的。



## 1. 调谐的设置

(1) 打开图 3.15 中的 LCLowpassFilter 原理图。

(2) 按【Shift】键，同时用鼠标分别选中原理图中的电容 C1、电感 L1 和电容 C2，然后释放【Shift】键，这时原理图中的滤波器电路如图 3.19 所示。

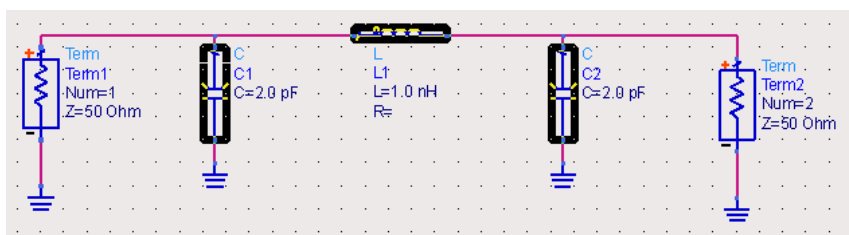




图 3.19 选中 JG 元件时的低通滤波器电路

(3) 单击工具栏中的  按钮，对电路调谐进行设置并调谐。单击  按钮后，同时弹出 3 个窗口，这 3 个窗口分别是参数调谐窗口、仿真状态窗口和数据显示窗口，其中数据显示窗口与图 3.18 完全一样，这是因为原理图中的两个电容和一个电感还都是初始值，没有被调谐。参数调谐窗口如图 3.20 所示。

(4) 在图 3.20 所示的参数调谐窗口，保持默认设置状态，然后单击原理图中的电容 C1，弹出【Instance Tune Parameters】对话框，在该对话框中选中【C】复选框，如图 3.21 所示。

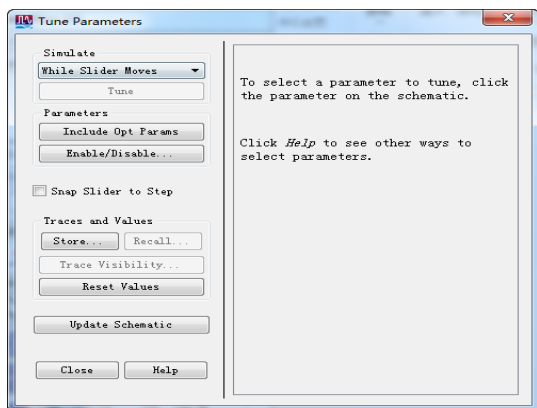


图 3.20 调谐窗口的初始状态

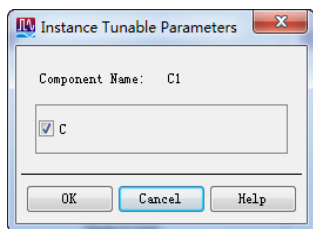


图 3.21 选择调谐元件

(5) 单击【OK】按钮，关闭该对话框，同时调谐窗口中出现电容 C1 的调谐范围，如图 3.22 所示。

图 3.22 中调谐的各参数含义如下。

- ①【Value】值开始时是原理图中电容的初始值，当调谐开始后，为电容调谐后的值。
- ②【Max】值是电容调谐的最大值。
- ③【Min】值是电容调谐的最小值。
- ④【Step】值是电容调谐的间隔。

上述参数中，【Max】、【Min】和【Step】值可以更改范围。

(6) 用同样的方法，让电感 L1 和电容 C2 的调谐范围也出现在调谐窗口中，也就是说 3 个元件都将调谐。



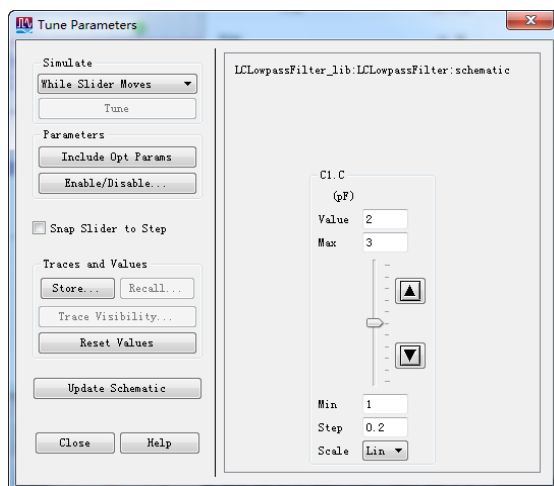



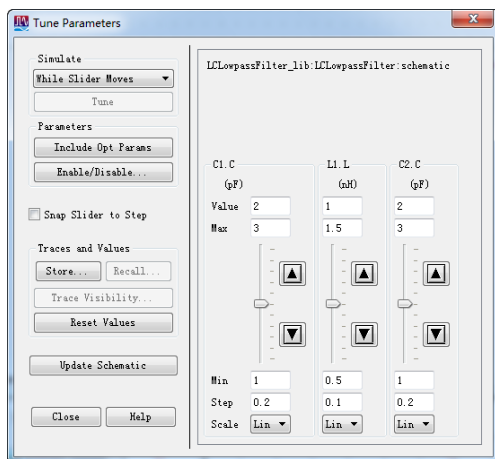
图 3.22 带有电容 C1 调谐范围的调谐窗口

## 2. 观察调谐电路的仿真参数

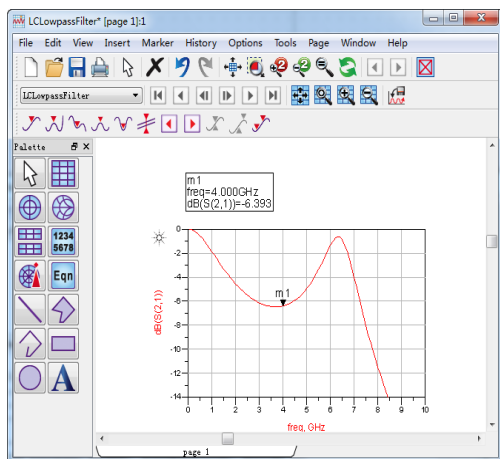
将调谐窗口设置完毕后，开始调谐仿真，调谐仿真的操作如下。

(1) 在调谐窗口中，保持【Max】、【Min】和【Step】数值的默认状态，然后手动调节电容 C1、电感 L1 和电容 C2 的数值滚动条，更改它们的数值，可以看到调谐窗口中的 Value 值在不断变化，同时数据显示视窗中的 S21，图形也在不断变化。

在数据显示视窗，单击工具栏中的  按钮，将标记 Marker 插入曲线上的一点；调节电感和电容的数值滚动条，来改变数据显示视窗中 S21 图形的变化过程，用图 3.23 来表示。



(a) 【Tune Parameters】对话框



(b) 调谐结果图

图 3.23 调谐的过程

(3) 如果图 3.23 中的曲线不能满足要求，还可以调整调谐窗口中的 Max 和 Min，来扩大元件的调谐范围。

(4) 通过调谐电容 C1、电感 L1 和电容 C2 的值，使 S21 的曲线达到满意结果后，单击调谐窗口中的【Update Schematic】按钮，然后单击【Close】按钮关闭调谐窗口；这时原理图中的电容 C1、电感 L1 和电容 C2 值已经更新为调谐后的值，如图 3.24 所示。

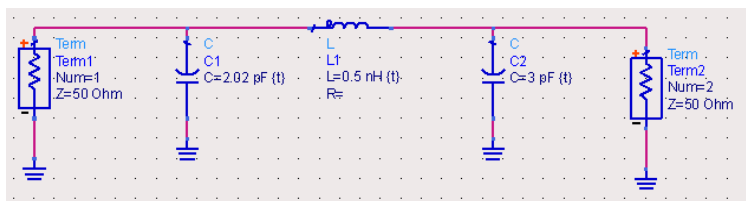


图 3.24 调谐结束后的低通滤波器电路

(5) 单击数据显示视窗中的  按钮，保存调谐后的曲线。

(6) 现在原理图上元件的值和数据显示视窗中图形的曲线，都已经是调谐后的数据，说明调谐操作已完成。

### 3.2.2 原理图分析

前面介绍的调谐方法，缺点是需要手动完成元件的调谐，当元件的数目较多时，这种方法费时费力，而且很难达到精准的目标数据。下面介绍原理图的优化方法，优化是软件自动完成的，当给出优化目标后，原理图会自动给出优化结果。

#### 1. 不加变量控件的优化与仿真

在优化与仿真之前，首先需要设置原理图中电容和电感的优化取值范围，然后再添加优化控件和目标控件，当设置完优化控件和目标控件后，就可以仿真了。

(1) 打开上节的 LCLowpassFilter 原理图，在图中关闭电容 C1、电感 L1 和电容 C2 的调谐状态，关闭调谐状态的步骤如下。

① 双击原理图中的 C1，弹出【Capacitor】对话框。

② 在【Capacitor】对话框中，单击【Tune/Opt/Stat/DOE Setup】按钮，打开【Setup】设置对话框。

③ 在【Setup】对话框中，选择【Tuning】选项卡，然后在【Tuning Status】栏选择【Clear】选项，单击【OK】按钮关闭对话框，上述操作关闭了电容 C1 的调谐状态。

④ 用同样的方法关闭电感 L1 和电容 C2 的调谐状态。

(2) 设置原理图中电容 C1 的优化取值范围。双击原理图中的电容 C1，弹出【Capacitor】对话框，单击【Tune/Opt/Stat/DOE Setup】按钮，打开【Setup】设置对话框，在【Setup】对话框中设置如下。

① 选择【Optimization】选项卡。

② 在【Optimization Status】栏选择【Enabled】选项。

③ 在【Type】栏选择【Continuous】选项。

④ 在【Format】栏选择【min/max】选项。

⑤ 在【Minimum Value】栏填入 0.5pF。

⑥ 在【Maximum Value】栏填入 5pF。

单击两次【OK】按钮完成【Setup】和【Capacitor】对话框的设置。完成设置的【Capacitor】和【Setup】对话框如图 3.25 所示。

(3) 用同样的方法设置原理图中电感 L1 和电容 C2 的优化取值范围。

① 电感在【Minimum Value】栏填入 0.5nH，在【Maximum Value】栏填入 5nH。

② 电容在【Minimum Value】栏填入 0.5pF，在【Maximum Value】栏填入 5pF。

(4) 在原理图的元件面板列表上, 选择优化元件【Optim/Stat/DOE】项, 元件面板上出现与【Optim/Stat/DOE】对应的元件图标, 如图 3.26 所示。

(5) 在图 3.26 所示的元件面板上, 选择优化控件 Optim 插入到原理图的画图区, 并选择目标控件 Goal 插入原理图的画图区, 共插入两个目标控件 Goal。

(6) 双击画图区的优化控件 Optim, 打开【Nominal Optimization】对话框, 在【Nominal Optimization】对话框中设置优化控件, 设置优化控件的步骤如下。

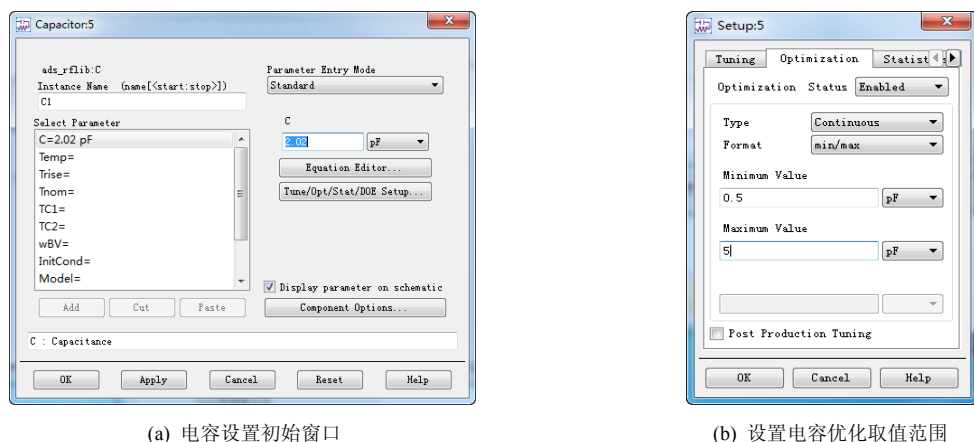


图 3.25 设置原理图中元件的优化取值范围

- ① 选择随机 Random 优化方式。
- ② 优化次数选择 100 次。
- ③ 其余的选项保持默认状态。

设置完成的【Nominal Optimization】对话框如图 3.27 所示。

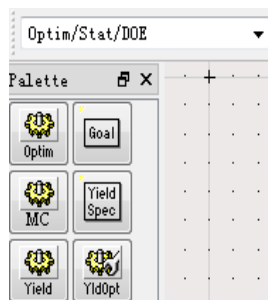


图 3.26 优化元件面板

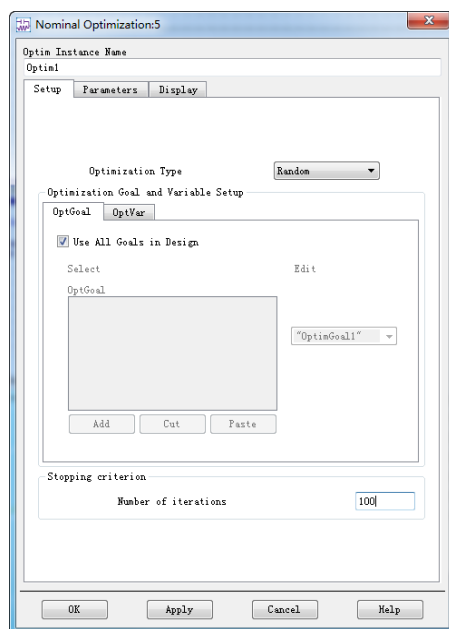


图 3.27 设置优化控件

(7) 下面设置两个目标控件 Goal，这两个目标控件在两个频率范围内用来控制散射参数 S(2, 1)。双击目标控件 1，设置如下。

- 选择 Expr 为 “dB(S(2,1))”。
- 选择 Sim InstanceName 为 “SP1”。
- 选择 IndepVar[1]为 “freq”。
- 选择 Indep1Min[1]为 1GHz。
- 选择 Indep1Max[1]为 3.0GHz。
- 其余的选项保持默认状态。

目标控件 2 的设置如下：

- 选择 Expr 为 “dB(S(2,1))”。
- 选择 Sim InstanceName 为 “SP1”。
- 选择 IndepVar[1]为 “freq”。
- 选择 Indep1Min[1]为 7GHz。
- 选择 Indep1Max[1]为 7.2GHz。
- 其余的选项保持默认状态。

设置完成的优化控件 Optim 和目标控件 Goal 如图 3.28 所示。

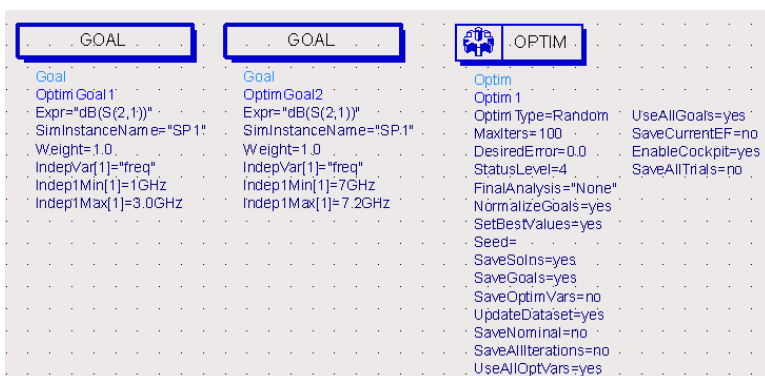


图 3.28 设置完成的优化控件和目标控件

(8) 现在原理图如图 3.29 所示。

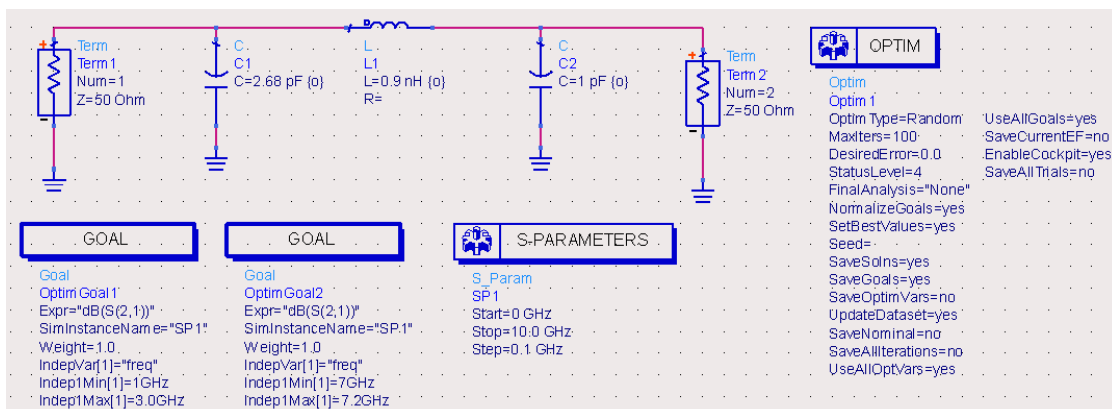





图 3.29 用于优化的低通滤波器原理图

(9) 现在可以对图 3.29 所示的原理图仿真了。在原理图工具栏中单击仿真【Simulate】图标，运行仿真，仿真过程中弹出了仿真状态窗口，记录了频率扫描范围、变量取值和仿真花费的时间等。

(10) 仿真结束后，选择【Simulate】→【Update Optimization Values】命令，将优化后的电感和电容值保存在原理图中。

(11) 仿真结束后，数据显示视窗自动弹出。在数据显示视窗用矩形图表示  $S_{21}$  曲线，矩形图横轴为频率范围，纵轴是用分贝 (dB) 表示的。 $S_{21}$  插入如下标记。

- ① 单击工具栏中的  按钮，在曲线的谷值处插入一个标记 m1。
  - ② 单击工具栏中的  按钮，在曲线 5.000GHz 处插入一个标记 m2。
  - ③ 单击工具栏中的  按钮，在曲线 8.000GHz 处插入一个标记 m3。
- 插入标记的  $S_{21}$  曲线如图 3.30 所示。

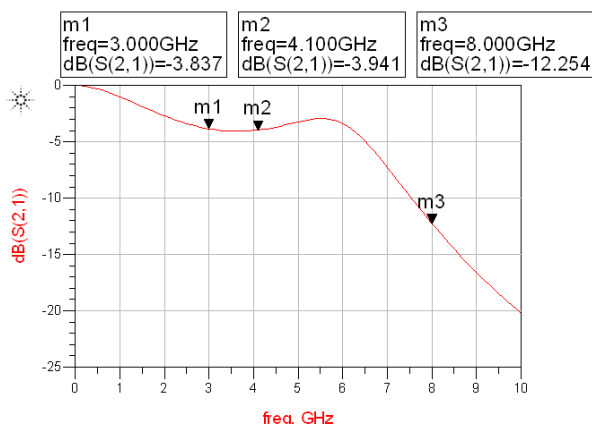


图 3.30 低通滤波器原理图优化数据

由图 3.30 可以看出， $S_{21}$  曲线满足技术指标。

## 2. 带变量控件的优化与仿真

可以在原理图中插入所需的变量控件 (VAR)，以此来对原理图进行优化、仿真。在优化、仿真之前，首先须要将电容与电感设置为变量，然后再设置对应的变量控件，VAR 会对原理图中的电容、电感给出优化取值范围。此时也需要添加优化控件和目标控件。在变量控件、优化控件和优化目标确定以后，就可以开始进行仿真了。

(1) 打开图 3.29 对应的 LCLowpassFilter 原理图。

(2) 将原理图中的 C1、L1 和 C2 设为变量。双击图中的电容 C1，会弹出【Capacitor】对话框，在此对话框中将电容值设置为变量 C1，然后单击【OK】按钮完成设置。使用同样的方法将 L1 和 C2 也设为变量。图 3.31 即为完成了设置的滤波器电路图。

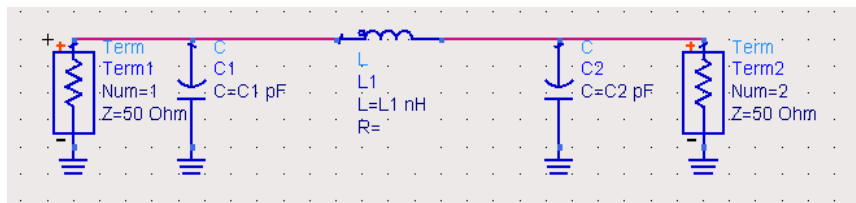


图 3.31 元件为变量的低通滤波器电路图

(3) 在原理图工具栏中, 单击变量【VAR】按钮, 将其导入原理图的画图区。

(4) 在画图区中双击“VAR”控件, 将弹出【Variables and Equations】设置对话框, 在设置框中对变量 C1、L1 和 C2 进行设置。对变量 C1 的设置如下:

① 在【Name】栏输入 C1。

② 在【Variable Value】栏输入 2。

③ 单击【Tune/Opt/Stat/DOE Setup】按钮, 打开【Setup】对话框, 选择【Optimization】选项卡, 然后在【Optimization Status】栏选择【Enabled】选项, 在【Type】栏选择【Continuous】选项, 在【Format】栏选择【min/max】选项, 在【Minimum Value】栏输入“0.5”, 在【Maximum Value】栏输入“5”。最后单击【OK】按钮结束 C1 的设置。单击【Add】按钮, 将 C1 添加到 VAR。

④ 用同样的方法设置变量 L1, L1=1, 选择【min/max】为“0.5~5”。

⑤ 用同样的方法设置变量 C2, C2=2, 选择【min/max】为“0.5~5”。

图 3.32 所示为完成设置的【Variables and Equations】对话框。

(5) 单击【OK】按钮, 完成对 VAR 控件的设置。设置完成的【VAR】控件如图 3.33 所示。

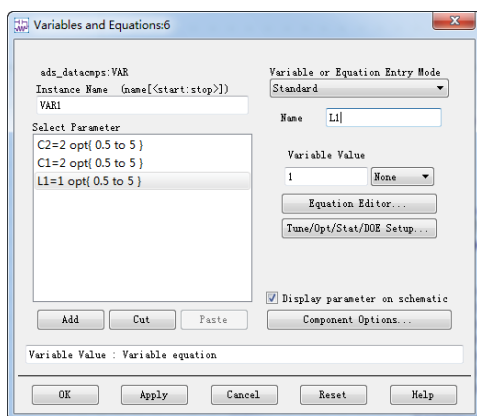


图 3.32 变量参数的设置

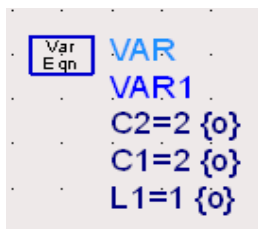


图 3.33 变量控件

(6) 保留优化控件和目标控件, 以及对它们的设置。

(7) 当变量控件、优化控件和优化目标确定后, 原理图如图 3.34 所示。

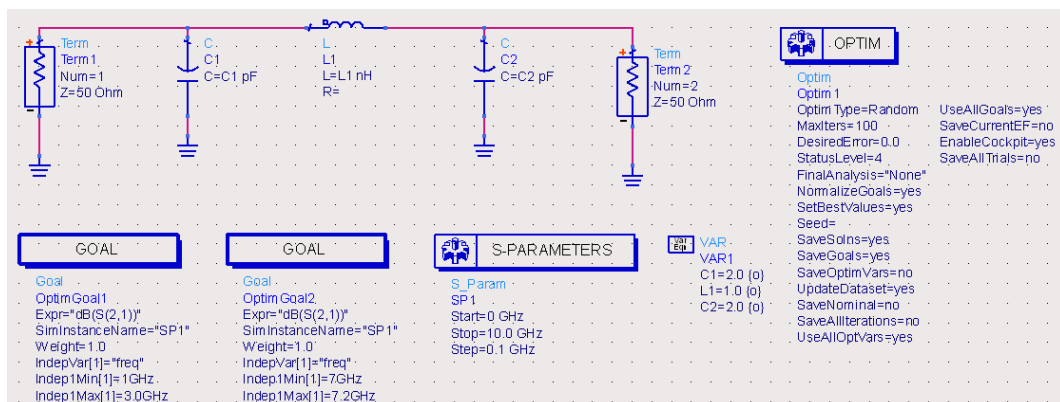


图 3.34 添加了变量控件用于优化的原理图

(8) 现在开始对图 3.34 进行仿真。仿真结束后, 选择【Simulate】菜单下的【Update Optimization Values】命令, 保存优化后的电感、电容值, 这时变量控件如图 3.35 所示。

(9) 仿真结束以后, 数据显示视窗将会自动弹出, 如图 3.36 所示。

比较图 3.30 与图 3.36 可以看出, S21 曲线都是满足技术指标要求的。

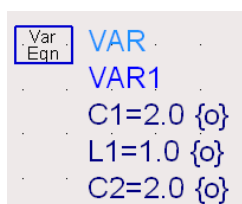


图 3.35 优化后的变量控件

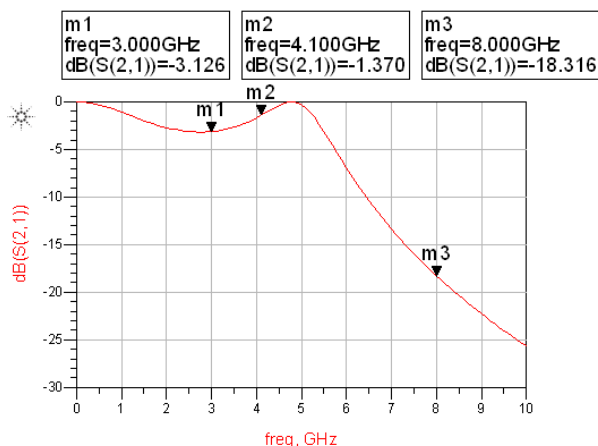


图 3.36 添加变量控件后低通滤波器的优化数据

### 3.3 使用向导的应用

ADS 软件自带有设计向导, 当用户提出设计目标以后, 设计向导会给出满足设计指标要求的原理图, 并给出原理图仿真和成品率仿真的快捷方式。设计向导是用户进行设计的重要辅助工具, 在后续章节中, 会常用到设计向导。

下面将以集总参数低通滤波器为例, 来介绍设计向导在原理图的设计和仿真中的具体应用。

#### 3.3.1 原理图生成

##### 1. 在主视窗创建新的原理图

(1) 选择主视窗中的【File】→【New】→【Schematic】命令, 弹出【New Schematic】对话框。

(2) 在【New Schematic】对话框中, 做如下设置:

- ① 输入新设计的名称 DG\_Filter;
- ② 选择新设计视窗为 schematic;
- ③ 选择【Schematic Design Templates】(原理图设计模板) 为 none;

然后单击【New Schematic】对话框中的【OK】按钮, 这样就完成了创建原理图 DG\_filter 的工作。

##### 2. 利用设计向导生成原理图

(1) 在原理图 DG\_Filter 中, 选择【Design Guide】菜单下的【Filter】选项, 会弹出如图 3.37 所示的【Filter】对话框, 在此对话框中选择【Filter Control Window】选项。



(2) 单击【Filter】对话框中的【OK】按钮，完成并关闭【Filter】对话框，同时将弹出【Filter DesignGuide】窗口，如图 3.38 所示。

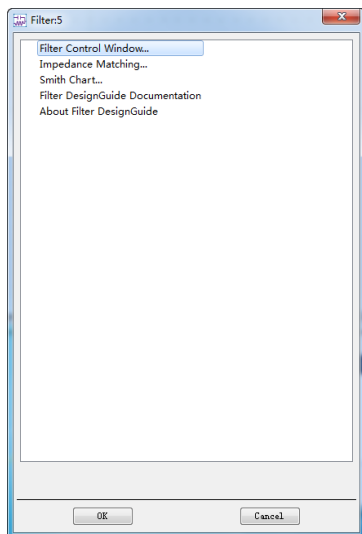


图 3.37 【Filter】对话框

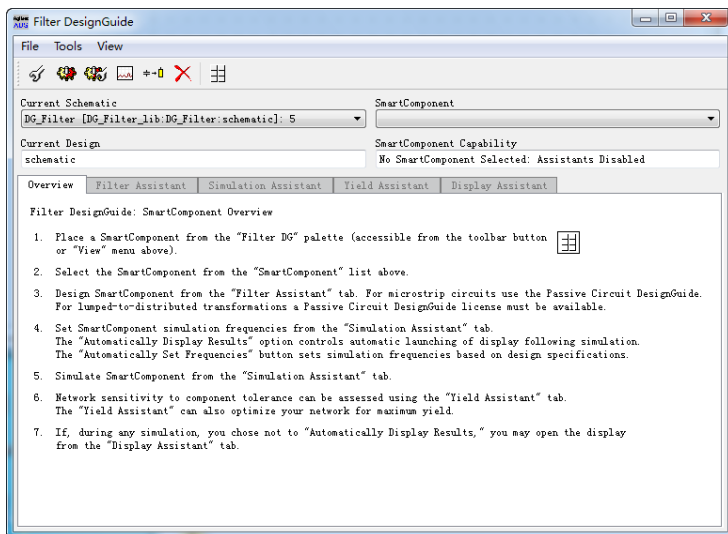



图 3.38 滤波器设计向导初始窗口

(3) 在【Filter DesignGuide】窗口中，单击工具栏中的【Component Palette-All】按钮，在 DG\_Filter 原理图的元件面板上会出现【Filter DG-All】列表下的元件面板，如图 3.39 所示。Filter DG-All 元件面板上列出了各种类型滤波器的设计向导，包括集总元件低通、高通、带通和带阻滤波器。

(4) 在 Filter DG-All 元件面板上选择“双端口低通滤波器”，导入原理图的画图区域，然后单击  按钮，结束当前命令。双端口低通滤波器原理图如图 3.40 所示。

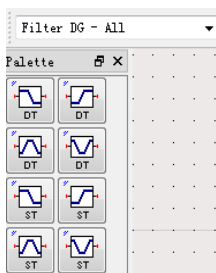


图 3.39 滤波器设计向导元件面板



图 3.40 双端口低通滤波器原理图

(1) 重新回到【Filter Design Guide】窗口，单击窗口中的【Filter Assistant】按钮，在【Filter Design Guide】窗口中出现滤波器设计向导，如图 3.41 所示。比较图 3.38 和图 3.41 可以看出，图 3.38 中【SmartComponent】项为空白，图 3.41 中【SmartComponent】项为“DA\_LCLowpassDT1”，说明 DG Filter 原理图中出现了快捷元件 DA\_LCLowpassDT1，设计向导就是用来设计原理图中的快捷元件 DA\_LCLowpassDT1。

下面将对图 3.41 中【Filter DesignGuide】窗口的参量进行介绍，具体内容如下：

- ① 【Source Impedances】为源阻抗，源阻抗的默认状态为  $50\Omega$ ；
- ② 【Load Impedances】为负载阻抗，负载阻抗的默认状态为  $50\Omega$ ；



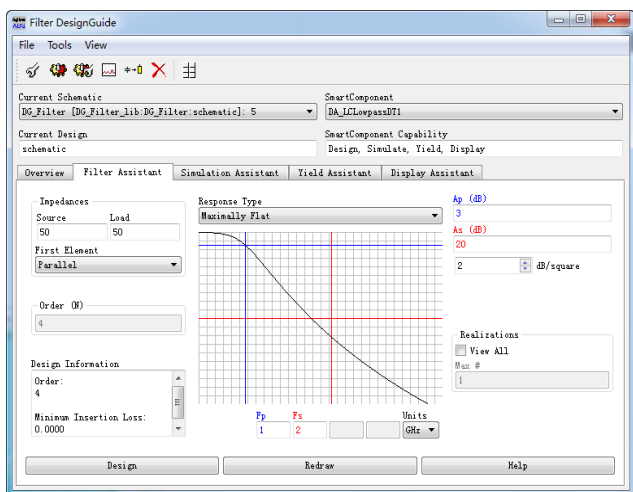


图 3.41 滤波器设计向导中的设计选项

③ **【First Element】**为滤波器第一个元件的串并联方式，**【Parallel】**为并联方式，**【Series】**为串联方式，软件的默认状态为**【Parallel】**并联方式；

④ **【Order (N)】**为滤波器的阶数，滤波器的阶数与滤波器的元件数相同；

⑤ **【Response Type】**为滤波器响应的方式，滤波器响应的方式有最大平滑 Maximally Flat（也称为巴特沃兹）、切比雪夫 Chebyshev、椭圆 Elliptic 和高斯 Gaussian 等，软件默认的滤波器响应方式为最大平滑 Maximally Flat；

⑥ **【Ap (dB)】**为滤波器通带的衰减；

⑦ **【As (dB)】**为滤波器阻带的衰减；

⑧ **【Fp】**为滤波器通带的频率；

⑨ **【Fs】**为滤波器阻带的频率。

(6) 图 3.41 所示为初始状态，下面将对图 3.41 中快捷元件 DA\_LCLowpass DT1 的参数进行设置：

① **【Response Type】**选为最大平滑 Maximally Flat；

② **【Ap (dB)】**选为 2；

③ **【As (dB)】**选为 35；

④ **【Fp】**选为 3GHz；

⑤ **【Fs】**选为 6GHz；

⑥ 其余选项保持默认状态。

单击**【Filter DesignGuide】**窗口中的**【Design】**按钮，软件中的设计向导就已经完成了设计。观察**【Filter Design Guide】**窗口，可以看到窗口中的曲线改变为图 3.42 所示。

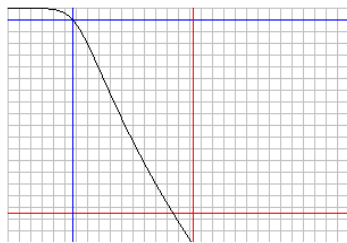


图 3.42 滤波器设计向导中符合指标的响应

(7) 现在原理图中的 DA\_LCLowpassDT1 元件已经有了子电路，下面观察子电路，步骤如下。

① 在原理图中选中 DA\_LCLowpassDT1 元件；

② 单击原理图工具栏中按钮，进入 DA\_LCLowpassDT1 元件子电路，DA\_LCLowpassDT1 元件子电路如图 3.43 所示。

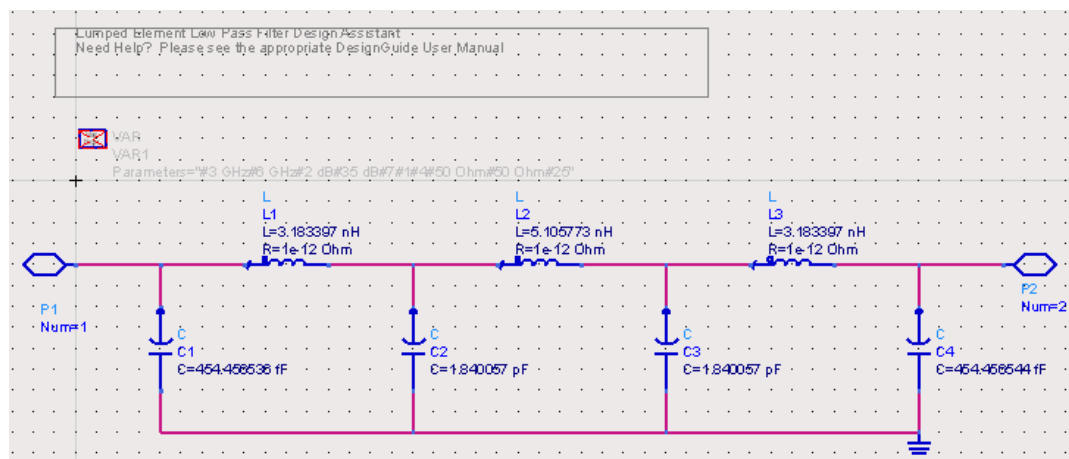



图 3.43 滤波器子电路

③ 由图 3.43 可以看出,满足技术指标要求的滤波器阶数为 7,也就是滤波器有 7 个元件。

(8) 在原理图的工具栏中,单击  按钮,将由 DA\_LCLowpassDT1 元件子电路退出,回到图 3.40 所示的原理图中。

### 3.3.2 仿真结果说明

针对上节设计出来的原理图,下面将利用设计向导来观看仿真的结果。

(1) 选中上节原理图中的 DA\_LCLowpassDT1 元件,然后选择【Design Guide】菜单下的【Filter】选项,进入【Filter DesignGuide】窗口。

(2) 在【Filter DesignGuide】窗口中,单击【Simulation Assistant】按钮。在图 3.44 中,需要设置仿真参量,然后再对上节的原理图进行仿真。图 3.44 中各参量的含义如下:

- ① 【Start】为扫描的初始频率;
- ② 【Stop】为扫描的终止频率;
- ③ 【Step】为扫描的步长;
- ④ 【Num. of Points】为扫描的点数。

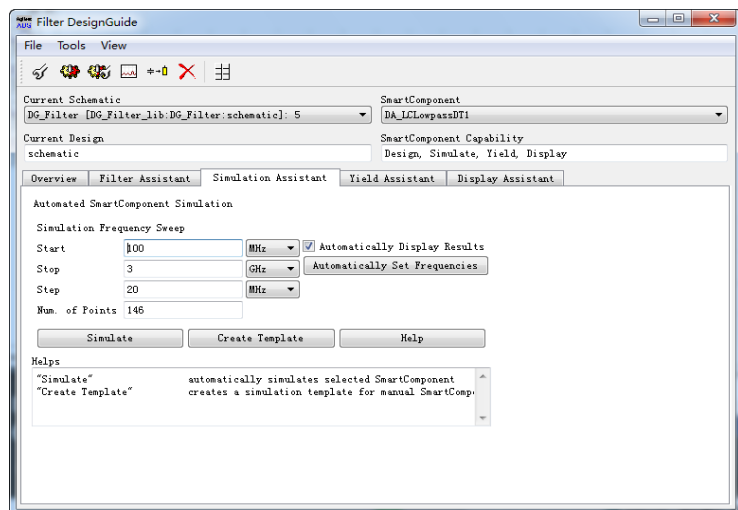


图 3.44 滤波器设计向导中的仿真选项

(3) 图 3.44 为初始状态, 将图 3.44 中的仿真参量设置如下:

- ① **【Start】** 设为 0GHz;
- ② **【Stop】** 设为 10GHz;
- ③ **【Step】** 设为 100MHz;
- ④ 其余保持默认状态。

当上述设置完成后, “Num. of Points” 将自动显示为 “101”, 表示扫描点数为 101。

(4) 设置完成后, 单击 **【Filter Design Guide】** 窗口中的 **【Simulate】** 按钮, 对原理图进行仿真, 仿真结果如图 3.45 所示。图 3.45 中的数据显示方式是软件自动设定的, 这里显示了  $S_{21}$  参量随频率的变化情况。如果还想观察其他曲线, 可以在图 3.44 中进行参数更改。

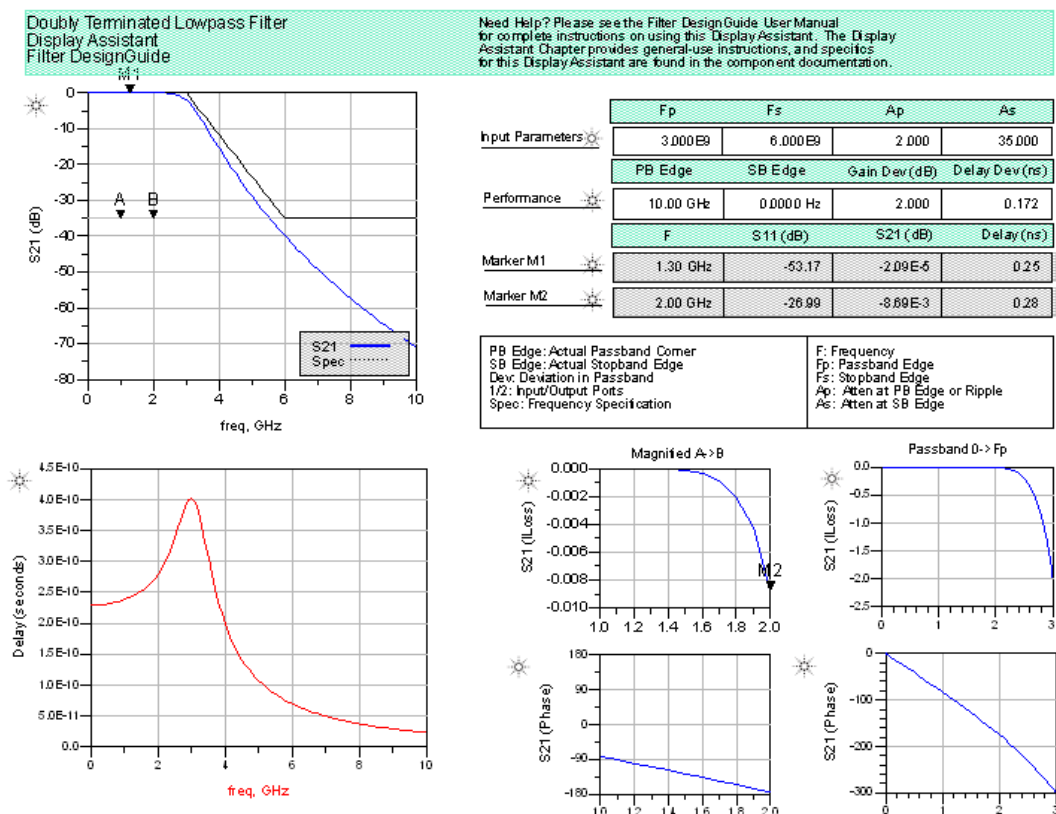


图 3.45 低通滤波器设计向导中的仿真结果

### 3.3.3 观察分析

下面观察原理图中 DALCLowpassDT1 元件的成品率。

(1) 重新回到 **【Filter Design Guide】** 窗口, 单击 **【Yield Assistant】** 按钮。在图 3.46 中, 需要设置统计参量、扫描参量, 才能观察成品率。

(2) 单击 **【Filter Design Guide】** 窗口中的 **【View Components】** 按钮, 将弹出 **【Statistical Component Values】** 对话框。在 **【Statistical Component Values】** 对话框中, 选中电容 C1 所在的行, 然后单击 **【Modify Statistics/Optimization】** 按钮, 将弹出 **【Modify Component Parameters】** 对话框, 在 **【Modify Component Parameters】** 对话框中的设置如下:

- ① 选择【Statistics】选项卡；
- ② 【Statistic Status】选为【Enabled】。这里表示元件开启统计状态；
- ③ 【Type】选择【Gaussian】。这里表示滤波器采用高斯响应类型；
- ④ 【Format】选为【+/-Std.Dev%】；
- ⑤ 【Std.Dev%】选为【10】。这里表示元件值偏离理想值 10%。

单击【Done】按钮，完成并关闭【Modify Component Parameters】对话框，再单击【Close】按钮，关闭【Statistical Component Values】对话框。【Statistical Component Values】对话框和【Modify Component Parameters】对话框如图 3.47 所示，这两个窗口已经将电容 C1 设置为统计状态。

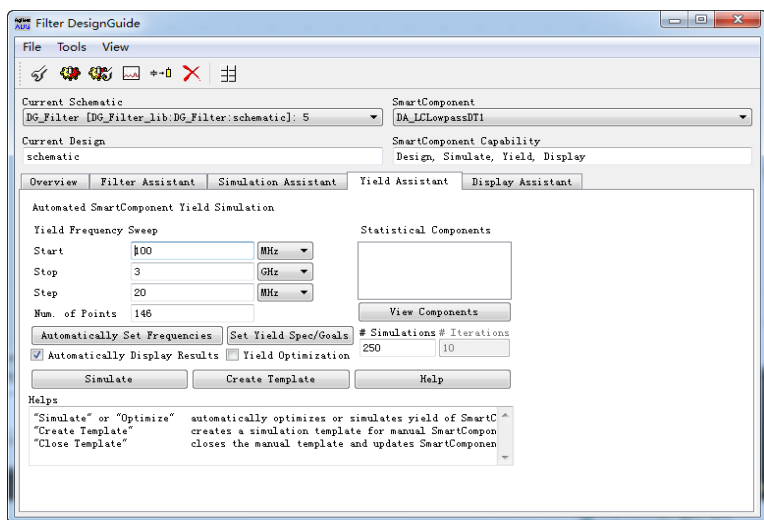
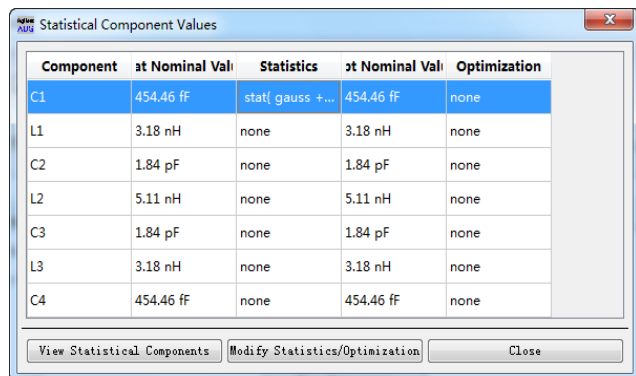
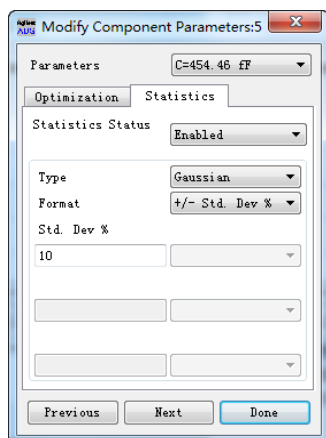


图 3.46 滤波器设计向导中的成品率选项



(a) 可以设置为统计状态的所有元件



(b) 将一个电容设置为统计状态


图 3.47 将电容 C1 设置为统计状态

(3) 完成设置以后，单击【Filter Design Guide】窗口中的【Simulate】按钮，对原理图进行仿真，仿真结果如图 3.48 所示。在图 3.48 中的数据的显示方式是软件自动设定的，这里显示成品率为 46%。如果还想观察其他曲线，可以在图 3.46 中进行参数更改。




- ② 频率扫描的起始值设为 0GHz;
- ③ 频率扫描的终止值设为 10GHz;
- ④ 频率扫描的步长设为 0.1GHz;
- ⑤ 其余的参数保持默认状态。

单击 S 参数仿真控件设置窗口中的【OK】按钮, 完成对 S 参数仿真控件的设置。现在用于仿真的集总参数低通滤波器原理图如图 3.50 所示。

(6) 现在对图 3.50 所示的原理图仿真。在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出。

(7) 数据显示视窗的初始状态没有任何数据显示, 用户需要自己选择显示的数据以及数据的显示方式, 这里选择的步骤如下。

- ① 在数据显示视窗中, 单击数据显示方式面板中的矩形图标, 插入到数据显示区;
- ② 选择矩形图的横轴为频率, 纵轴为用分贝 (dB) 表示的 S21;
- ③ 在 S21 曲线上插入两个 Marker, S21 曲线如图 3.51 所示, S21 表示信号由端口 1 到端口 2 的正向传输系数, 图中显示参数满足指标要求;
- ④ 单击工具栏中的  按钮, 保存数据。

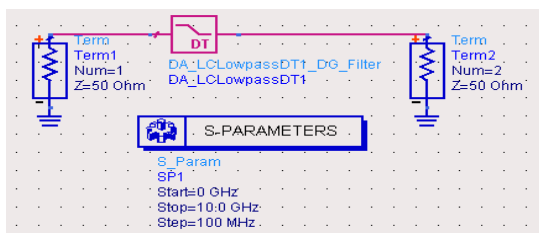


图 3.50 用于仿真的集总参数低通滤波器原理图

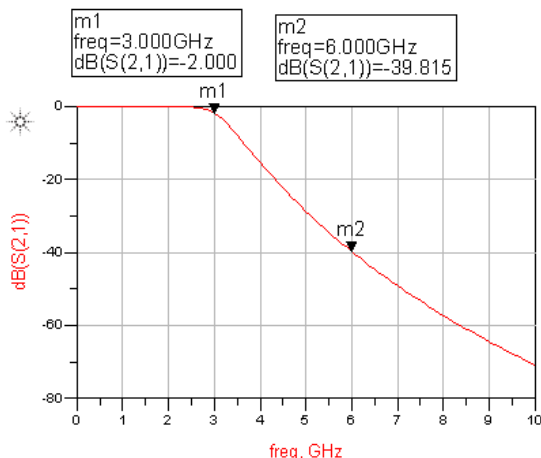


图 3.51 低通滤波器数据显示视窗

(8) 通过前面的讨论可以看出, 原理图中的元件是可以带有子电路的, 用户也可以将经常使用的电路设置为子电路, 已达到复用的效果。

## 习题

1. 本章主要介绍 ADS 设计向导, 请简述利用 ADS 设计向导建立相关项目时的设计流程。
2. 在大多数 ADS 仿真过程中, 比较重要的一个步骤是原理图的优化和分析, 请归纳其一般方法。
3. 利用 ADS 设计向导能有效提高仿真效率, 请熟练掌握该功能, 并总结在应用过程中所遇到的相关问题。

## 第4章 ADS 仿真设计与实例

在第3章的滤波器电路中,采用S参数仿真观察了滤波器的频率特性,实际上ADS软件不仅可以对电路进行S参数仿真,而且可以对电路进行其他方式的仿真。按照电路种类的不同,射频电路需要采用不同的仿真方式,例如对于有源电路,需要采用直流仿真来观察电路的静态工作点,又如对于非线性电路,需要采用谐波平衡仿真来观察频域信号经过非线性电路后产生的各种谐波和交调,仿真方式的多样性是ADS软件的优点之一,本章将对ADS软件的多种仿真方式和仿真功能加以概述。

ADS软件的仿真功能十分强大,涉及的内容也很庞杂,ADS软件的仿真方式包括直流仿真、交流仿真、S参数仿真、谐波平衡仿真、大信号S参数仿真、增益压缩仿真、电路包络仿真、瞬态仿真、工具仿真、预算仿真和排序仿真,这些仿真可以对电路进行线性和非线性仿真、频域和时域仿真以及电路和系统仿真等。在射频电路的设计中,仿真是必不可少的,当射频电路设计完成后,不同的电路需要进行不同的仿真,只有通过仿真才能看到电路设计是否达到指标要求。

本章首先概述ADS软件的各种仿真功能,然后针对每一种仿真,分别介绍仿真元件面板和仿真控件,并配合给出各种仿真的应用实例。

### 4.1 仿真概述

ADS软件有多种仿真功能,这些仿真功能几乎覆盖了射频电路所有的参数指标,本节将概述这些仿真功能。

#### 4.1.1 仿真功能分类

##### 1. 原理图中的仿真方法

在ADS软件的原理图中,可以方便地查看到ADS软件的所有仿真方法,这些仿真方法已经在原理图的元件面板列表中列出。下拉原理图的元件面板列表,可以看到各种仿真方法,这些仿真方法如图4.1所示。

由图4.1可以看出,元件面板列表由上到下分别列出了如下的仿真方法。

【Simulation-DC】: 直流仿真。

【Simulation-AC】: 交流仿真。

【Simulation-S\_Param】: S参数仿真。

【Simulation-HB】: 谐波平衡法仿真。

【Simulation-LSSP】: 大信号S参数仿真。

【Simulation-XDB】: 增益压缩仿真。

【Simulation-Envelope】: 电路包络仿真。

【Simulation-Transient】: 瞬态仿真。

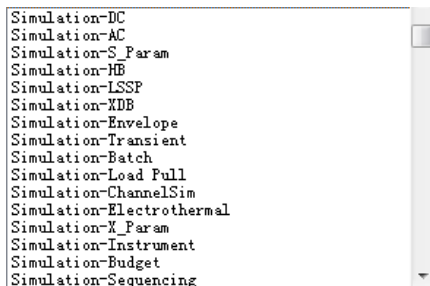


图4.1 原理图中的各种仿真方法



- 【Simulation-Batch】: 批仿真。
- 【Simulation-Load Pull】: 负载牵引仿真。
- 【Simulation-ChannelSim】: 信道仿真。
- 【Simulation-Electrothermal】: 电热仿真。
- 【Simulation-X\_Param】: X 参数仿真。
- 【Simulation-Instrument】: 工具仿真。
- 【Simulation-Budget】: 预算仿真。
- 【Simulation-Sequencing】: 仿真排序。

## 2. 元件面板上的各种仿真控件

当选定元件面板列表上的某一仿真项后, 元件面板随之确定, 元件面板上列出了这种仿真的多个控件, 这些控件用来设置和显示仿真的各种参数。例如, 当选定元件面板列表上的直流仿真时, 元件面板如图 4.2(a)所示, 图中的图标是直流仿真控件, 这些控件可以插入原理图中, 用来设置和显示直流仿真的各种参数。又如, 当选定元件面板列表上的谐波平衡仿真时, 元件面板如图 4.2(b)所示, 图中的图标是谐波平衡仿真控件, 这些元件同样可以插入原理图中, 用来设置和显示谐波平衡仿真的各种参数。



图 4.2 原理图中的各种仿真面板及列表

## 4.1.2 仿真功能综述

### 1. ADS 软件的仿真功能

在 ADS 软件中, 不同的仿真方法具有不同的仿真功能, 下面对各种仿真功能概述如下。

#### (1) 直流仿真。

电路的直流仿真是所有射频有源电路分析的基础, 在执行有源电路交流仿真、S 参数仿真或谐波平衡仿真等其他仿真之前, 首先需要进行直流仿真, 直流仿真主要用来分析电路的直流工作点。直流仿真元件面板包括直流仿真控制器、直流仿真设置控制器、参数扫描计划控制器、参数扫描控制器、节点设置和节点名控件、显示模板控件和仿真测量等式控件, 这些面板上的元件经过设置后, 既可以提供有源电路单点的直流分析, 又可以提供有源电路参数扫描分析。

#### (2) 交流仿真。

交流仿真能获得电路小信号时的多种参数, 如电压增益、电流增益、跨导和噪声等。交流仿真执行时, 首先对电路进行直流分析, 并找到非线性器件的直流工作点, 然后将非线性器件在静态工作点附近进行线性化处理, 分析小信号在静态工作点附近的输入/输出关系。



### (3) S 参数仿真。

S 参数仿真是射频电路最重要的仿真,可以对线性小信号在频域进行仿真。S 参数仿真元件面板有反射系数和驻波比控件,有功率增益、电压增益和增益波纹控件,有输入阻抗和输入导纳控件,有负载和源稳定性控件,有噪声功率和噪声系数控件,有史密斯圆图上的增益圆、稳定圆和噪声圆控件,综合利用 S 参数仿真的各种控件,可以全面分析线性网络的特性。与直流仿真相似,S 参数仿真也有仿真控制器、仿真设置控制器、参数扫描计划控制器、参数扫描控制器、节点设置和节点名控件、显示模板控件和仿真测量等式控件。

### (4) 谐波平衡仿真。

谐波平衡仿真用于非线性电路的仿真,主要在频域内使用,用来分析频域信号经过非线性电路后产生谐波和交调的情况。谐波平衡仿真元件面板有频域电流显示控件、频域电压显示控件、功率谱密度显示控件,有输入三阶交调点分析控件、输出三阶交调点分析控件、N 阶截止点分析控件,有频率预算控件、增益预算控件、反射系数预算控件、三阶交调预算控件、噪声功率预算控件等。与直流仿真相似,谐波平衡仿真也有仿真控制器、仿真设置控制器、参数扫描计划控制器、参数扫描控制器、节点设置和节点名控件、显示模板控件和仿真测量等式控件。

### (5) 电路包络仿真。

电路包络仿真器是近年来通信系统的一项标志性技术,其特点是对于任何类型的高频调制信号,均可以分解为时域和频域两个部分分别进行处理。在时域上,对相对低频的调制信息进行直接采样处理,而对相对高频的载波部分,则在频域进行处理,这样的结合使仿真器的效率和速度都得到了一个质的飞跃,因此电路包络仿真是目前进行数字射频和微波系统高频仿真时,最有效率的工具之一。电路包络仿真是一种混合的频域/时域技术,多用在涉及调制解调的电路和系统中,在通信系统中,CDMA、GSM、QPSK 和 QAM 等系统可以采用电路包络仿真,在雷达系统中,LFM 波、非线性调频波和脉冲编码等也可以采用电路包络仿真。

### (6) 大信号 S 参数仿真。

大信号 S 参数仿真可看做是 S 参数仿真的一种,不同的是 S 参数仿真一般只用于对小信号 S 参数的分析,而大信号 S 参数仿真则执行大信号 S 参数分析,因此大信号 S 参数在设计功率放大器时十分有用。大信号 S 参数仿真是基于对非线性电路的仿真,一般与谐波平衡仿真和增益压缩仿真配合使用。

### (7) 增益压缩仿真。

增益压缩仿真将理想的线性功率曲线与实际功率曲线的偏离点相比较,用于寻找用户自定义的增益压缩点。增益压缩仿真用于计算放大器或混合器的增益压缩点,它是从一个小的输入值开始逐步增加输入功率,在得到输出需要的增益压缩量时停止执行仿真,通过增益压缩仿真可以得到射频器件的 1dB 或 3dB 压缩点。

### (8) 瞬态仿真。

高频 SPICE 瞬态分析可以分析线性与非线性电路的瞬态响应,是一种时域的仿真分析方法。瞬态仿真是传统 SPICE 软件采用的最基本仿真方法,SPICE 软件可以说是所有电路仿真软件的鼻祖,能够对模拟和数字电路进行仿真。但与传统 SPICE 软件相比,高频 SPICE 瞬态分析有很多优点,例如可以直接使用频域分析模型,对微带线和分布参数滤波器等进行分析,这是因为 ADS 在仿真时可以将频域分析模型进行拉氏变换后再进行瞬态分析,因此高频 SPICE 瞬态仿真分析能够对频域模型进行分析。

2. 射频电路模块常用的仿真方式

前面描述了 ADS 软件的主要仿真方法，由于每种仿真方法只能完成特定的仿真指标，因此在仿真一个完整电路时，常采用多个仿真方法来完成所有指标的仿真。电路在仿真时，一次只能执行一个仿真器的仿真，在执行此仿真时，别的仿真器应处于非激活状态。表 4.1 列出了各种射频模块常用的仿真方式。

表 4.1 射频电路模块常用的仿真方式

射频模块	常用仿真方式	仿真参数
滤波器	S 参数仿真	S 参数
功率分配器	S 参数仿真	S 参数
定向耦合器	S 参数仿真	S 参数
小信号放大器	直流仿真	静态工作点状态
	S 参数仿真	S 参数
混频器	直流仿真	静态工作点状态
	交流仿真	增益和噪声
	谐波平衡仿真	三阶交调和中频
	瞬态仿真	瞬态响应
	电路包络仿真	包络特性
功率放大器	S 参数仿真	S 参数
	谐波平衡仿真	各种谐波和交调
	大信号 S 参数仿真	大信号 S 参数
	增益压缩仿真	1dB 增益压缩点
	瞬态仿真	瞬态响应
	电路包络仿真	包络特性
振荡器	直流仿真	节点电压和电流，工作点状态
	瞬态仿真	瞬态响应
	谐波平衡仿真	各种谐波
	电路包络仿真	包络特性

4.2 直流仿真

直流仿真用来分析射频电路的直流工作点特性，直流仿真是射频电路分析的基础，可以作为其他所有仿真的起始点。直流仿真不仅可以提供单点的直流分析，而且还可以提供对参数的扫描仿真，扫描参量可以是电压源和电流源的值，也可以是电路中的其他元件参数。本节将介绍直流仿真的基本功能，主要介绍直流仿真面板、直流仿真控件、仿真的相关参数和参数的设置方法等关于直流仿真的基本内容。

4.2.1 仿真界面

ADS 原理图中有专门针对直流仿真的元件面板，如图 4.3 所示，元件面板中列出了直流仿真的所有仿真控件。

在图 4.3 所示的直流仿真面板上，共有 8 个直流仿真控件，下面将对这 8 个直流仿真控件分别加以说明。



图 4.3 直流仿真面板

1. 直流仿真控制器（DC）

直流仿真控制器是控制直流仿真的最主要控件，使用直流仿真控制器可以设置仿真的扫描参数和参数的扫描范围等相关参数。

## 2. 直流仿真设置控制器 (Options)

直流仿真设置控制器主要用来设置直流仿真的外部环境和计算方式,如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件的特性等相关内容。

## 3. 参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)

参数扫描计划控制器主要用来控制仿真中的参数扫描计划,用户可以通过这个控制器添加一个或多个扫描变量,并制订相应的扫描计划。

## 4. 参数扫描控制器 (Parameter Sweep)

参数扫描控制器用来控制仿真中的扫描参数,这个扫描参数可以对多个仿真的仿真实例进行扫描。

## 5. 节点设置 (NdSet) 与节点名 (NdSet Name) 控件

节点设置与节点名控件用来设置直流仿真的相关节点以及节点名称,并可以设置插入节点处的参考电压等。

## 6. 显示模板控件 (Display Template)

显示模板控件用来设置显示模板,显示模板用来设置仿真结果的显示方式。

## 7. 仿真测量等式控件 (MeasEqn)

仿真测量等式控件用来添加一个或多个仿真测量等式,在仿真结束后,这个等式的结果将包含在仿真结果的数据组中。

# 4.2.2 仿真操作

在执行直流仿真前,需要对直流仿真控件的参数进行设置,软件是根据各个参数来执行仿真的。在直流仿真的8个控件中,只有直流仿真控制器(DC)是必须要设置的,其他控件根据需求来决定是否需要设置。下面介绍直流仿真中的相关参数,并给出设置参数的方法。

## 1. 直流仿真控制器

在进行直流仿真前,需要将直流仿真控制器(DC)插入原理图中并进行设置,下面给出直流仿真控制器各个参数的设置方法和含义。

### 1) 直流仿真控制器参数设置的操作步骤

(1) 在原理图的元件面板列表上,选择直流仿真【Simulation-DC】项,元件面板上出现直流仿真的8个控件图标。

(2) 在直流仿真元件面板上,单击直流仿真控制器(DC),然后再单击原理图的画图区,将直流仿真控制器插入原理图的画图区。单击工具栏中的 $\square$ 按钮,结束当前命令。这时原理图如图4.4所示,这是直流仿真控制器的默认状态,在进行直流仿真前,需要对图4.4所示的直流仿真控制器进行设置。

(3) 双击原理图画图区的直流仿真控制器(DC),出现【DC Operating Point Simulation】对话框,对话框中有【Sweep】、【Parameters】、【Output】和【Display】项,在对话框中可以对这些项进行参数设置。【DC Operating Point Simulation】对话框中的【Sweep】(扫描参量)和【Parameters】(仿真参量)项,如图4.5所示。

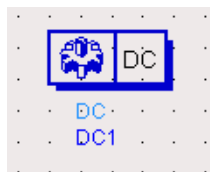
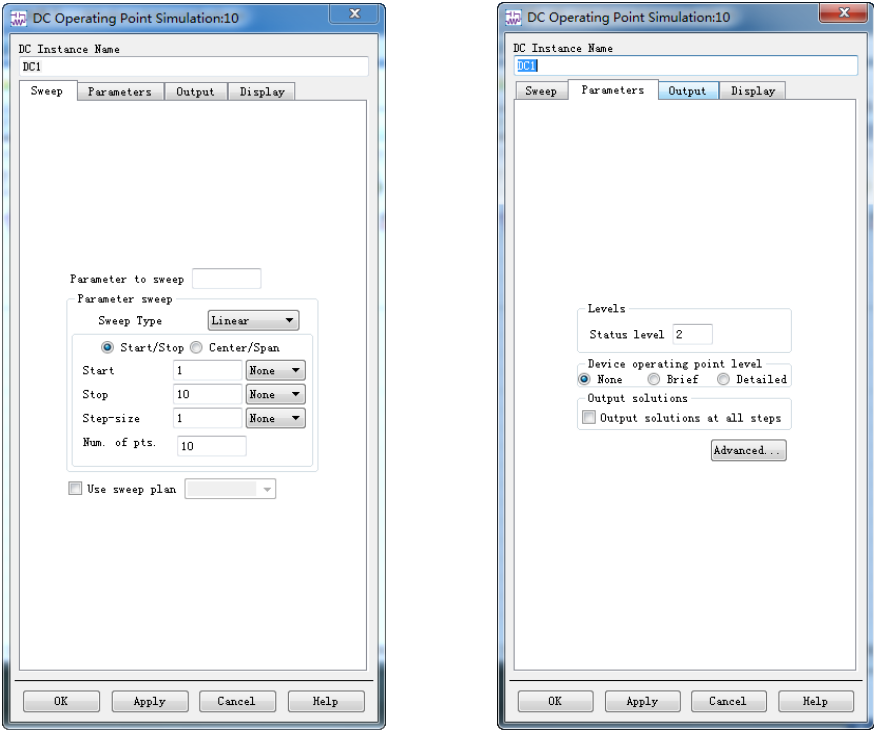


图4.4 原理图中直流仿真控制器的默认状态



(a) 扫描参量设置界面 (b) 仿真参量设置界面

图 4.5 直流仿真控制器的参量设置界面

2) 直流仿真控制器中参数的含义和设置方法

直流仿真控制器中需要对扫描参量和仿真参量等进行设置，下面分别列表对扫描参量和仿真参量加以描述。

(1) 扫描参量。扫描参量给出了直流仿真的扫描类型和扫描范围等，扫描参量在直流仿真控制器设置窗口中的【Sweep】项中设置，扫描参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.2 所示。

表 4.2 扫描参量

参数名称	参数描述	备注
Parameter to Sweep	需要扫描的变量名称	必须是原理图中包含的变量名称
Sweep Type	变量扫描类型	Single Point 为单点仿真 Linear 为线性扫描 Log 为对数扫描
Start/Stop 或 Center/Span	扫描范围设定类型	Start/Stop 表示扫描变量范围由起始值和终止值确定 Center/Span 表示扫描变量的范围由中心值和取值范围确定
Start	扫描参数的起始值	仅在扫描范围设定类型选择 Start/Stop 时有效
Stop	扫描参数的终止值	仅在扫描范围设定类型选择 Start/Stop 时有效
Step-size	扫描参数的间隔	仅在扫描范围设定类型选择 Center/Span 时有效
Pts./decade	参数每增加 10 倍扫描的点数	仅在扫描范围设定类型选择 Log 是有效
Num.of pts	扫描参数的点数	在给定的 Start、Stop 和 Step-Size (Pts/decade) 后，系统自动生成
Use sweep plan	是否使用计划扫描	如果选择使用扫描计划，必须添加“SWEEP PLAN”控件，并在控件中进行相应的设置

(2) 仿真参量。仿真参量用来控制仿真的状态信息提示和仿真结束保存等信息，仿真参量在直流仿真控制器设置窗口中的【Parameters】项中设置，仿真参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.3 所示。

表 4.3 仿真参量

参数名称	参数描述	备注
Status level	设置仿真状态窗口中显示信息多少的参数	0 代表显示很少的仿真信息 1 和 2 表示显示正常的仿真信息 3 和 4 表示显示较多的仿真信息
Device operating point level	保存原理图中有源器件和部分线性器件操作点的设置	None: 不保存 Brief: 仅保存部分元件的电流、功率和一些线性器件的参数 Detailed: 保存所有直流仿真工作点的值，如电流、电压、功率和线性器件参数
Output solutions	数据文件中仿真结果的保存情况	在仿真的数据文件中详细地保存大多数仿真结果

(3) 高级参数。直流仿真控制器中还有一些高级参数设置，高级参数在直流仿真控制器设置窗口中的【Parameters】项中的 Advanced 设置，这些高级参数的参数名称、参数含义和备注在表 4.4 中做了说明。

表 4.4 直流仿真中的高级参数

参数名称	参数描述	备注
Max Delta V	每次重复时节点电压的最大改变值	如果没有指定值，则默认值为电阻热噪声电压的 4 倍，大概为 0.1V
Max. Iterations	仿真执行的最大重复数	仿真会在仿真结果收敛、出现错误或达到最大执行重复数时停止
Mode	收敛算法模式选择	这里选择的收敛算法只在直流仿真模式下启用
Arc Max Step	acr-length 增量/减量的最大间隔	默认值为 0，表示没有最大间隔限制
Arc Level Max Step	源级 acr-length 增量/减量的最大间隔	默认值为 0，表示没有最大间隔限制
Arc Min Value	acr-length 的最小允许值	无
Arc Max Value	acr-length 的最大允许值	无
Max Step Ratio	最大间隔数	默认值为 100
Max Shrinkage	acr-length 增量/减量的最小间隔	默认值为 1e-5
Limiting Mode	设置每次重复时节点值变化的限制	可以选择 Global Element CompreSSion，Global Device-baSed Limiting，Dynamic Element CompreSSion，Global Vector Scaling，No Limiting 等 6 个限制级别

### 3) 直流仿真控制器参数的显示

当设置完成直流仿真控制器中的参数后，可以在原理图中将设置结果显示出来。显示设置结果的操作步骤如下。

(1) 双击原理图画图区的直流仿真控制器 (DC)，出现【DC Operating Point Simulation】对话框。

(2) 对话框中的 Display 项，用来显示设置完成的参数。如果希望显示某参量，需要选中某参量，如图 4.6 所示。

(3) 单击【OK】按钮，关闭对话框，完成原理图中直流仿真控制器的设置。如果将【DC Operating Point Simulation】对话框中【Display】项的所有参数都选中，原理图中会显示出直流仿真控制器的所有参数，如图 4.7 所示。

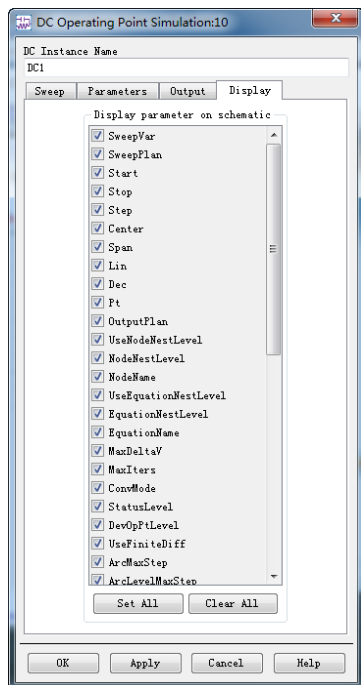


图 4.6 直流仿真控制器中的显示项界面

图 4.4 与图 4.7 都是插入原理图中的直流仿真控制器，图 4.4 是未设置的状态，图 4.7 是设置后的状态。实际上，大多数直流仿真控制器只有少数参量需要设置，大部分参量都保持默认状态。

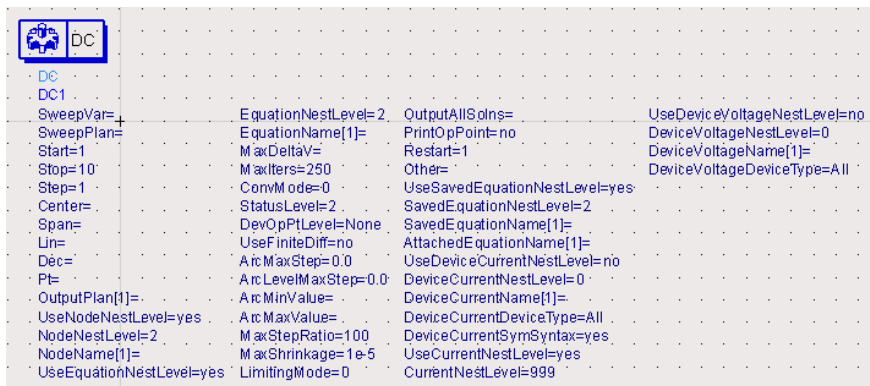


图 4.7 原理图中显示所有参量的直流仿真控制器

## 2. 直流仿真设置控制器

用同样的方法可以设置并显示直流仿真设置控制器，原理图中的直流仿真设置控制器如图 4.8 所示，图中显示了可以设置的所有参量。

## 3. 参数扫描计划控制器

可以设置并显示参数扫描计划控制器，原理图中的参数扫描计划控制器如图 4.9 所示，图中显示了可以设置的所有参量。

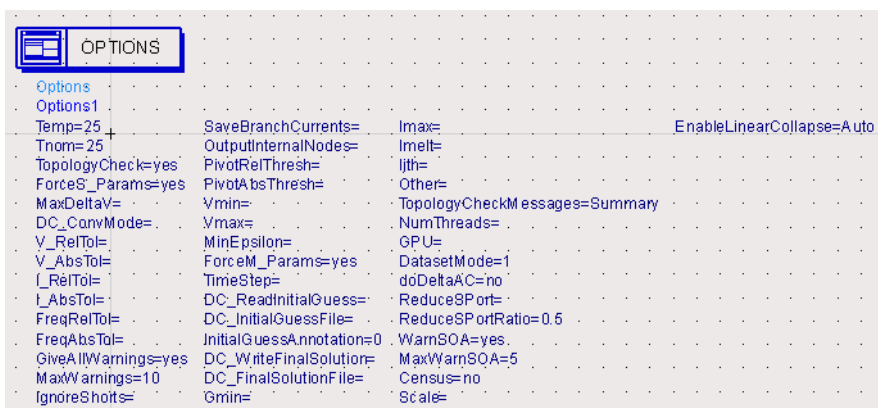


图 4.8 原理图中的直流仿真设置控制器

#### 4. 参数扫描控制器

可以设置并显示参数扫描控制器，原理图中的参数扫描控制器如图 4.10 所示，图中显示了可以设置的所有参量。

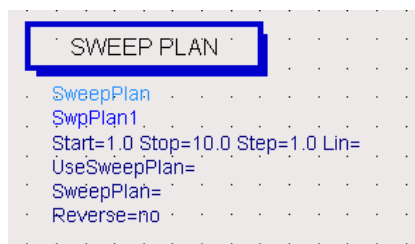


图 4.9 原理图中的参数扫描计划控制器

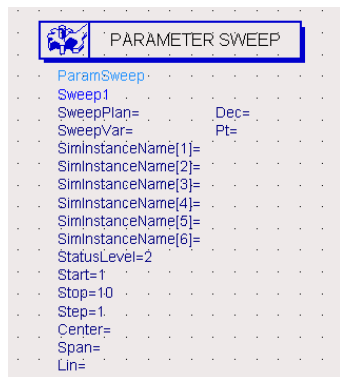


图 4.10 原理图中的参数扫描控制器

#### 5. 节点设置与节点名控件

可以设置并显示节点，原理图中的节点设置与节点名控件如图 4.11 所示。

#### 6. 显示模板控件

可以设置并显示模板控件，原理图中的模板控件如图 4.12 所示。

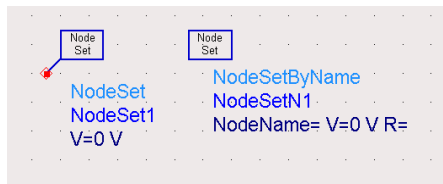


图 4.11 原理图中的节点设置与节点名控件



图 4.12 原理图中的显示模板控件

#### 7. 仿真测量等式控件

可以设置并显示仿真测量等式，原理图中的仿真测量等式如图 4.13 所示。

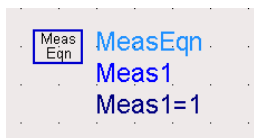


图 4.13 原理图中的仿真测量等式

### 4.2.3 仿真例程


ADS 软件有两个自带的直流仿真例程，一个是单点的直流仿真例程，一个是带变量扫描的直流仿真例程，这两个例程可以帮助读者了解直流仿真的基本内容和基本方法。本节将给出单点和带变量扫描这两个直流仿真例程的电路原理图，并将电路原理图的仿真结果显示出来。

#### 1. 单点直流仿真例程

##### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗打开单点直流仿真例程原理图，打开原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。

(2) 选择主视窗中的【View】→【Example Directory】命令，在主视窗的文件管理区可以看到 examples 文件夹，文件夹内是所有的例程。也可以单击主视窗工具栏的  按钮，在文件管理区同样可以看到 examples 文件夹及其内容。

(3) 双击 examples 文件夹中的 Tutorial 文件夹，进入该文件夹，Tutorial 文件夹内有多种学习指导例程。

(4) 双击 Tutorial 文件夹中的 SimModels\_wrk.7zads，将其解压到当前工作目录。

此时在项目浏览区可以看到 SimModels\_wrk 下所有的设计，schematic 为原理图文件。SimModels\_wrk 工作空间中的子空间 DC1 和 DC2 为直流仿真，其中 DC1 为单点直流仿真原理图，DC2 为带变量扫描的直流仿真原理图。

(5) 单击项目浏览区的 DC1，展开设计 DC1，出现 DC1 的原理图文件，双击 schematic 就可以打开单点直流仿真原理图了。单点直流仿真原理图如图 4.14 所示。

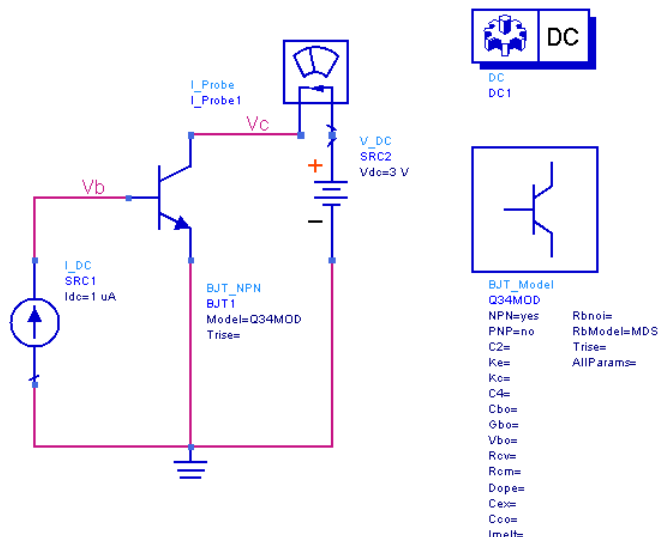


图 4.14 单点直流仿真原理图

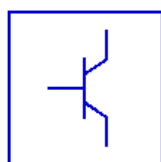


## 2) 原理图说明

单点直流仿真原理图由 BJT 晶体管、直流电流源、直流电压源、电流指示表和直流仿真控制器构成,下面对上述构成元件加以说明。

### (1) BJT 晶体管。

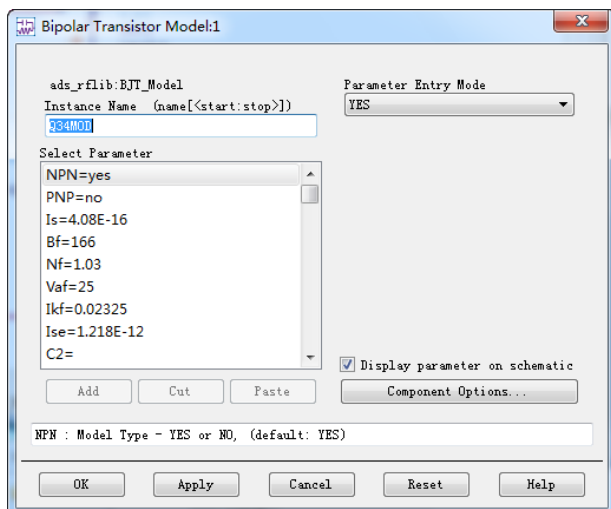
在图 4.14 所示的单点直流仿真原理图的电路中, BJT\_NPN 晶体管没有子电路,这个晶体管的参数主要是由电路旁边的晶体管模型 BJT\_Model 设定的,双击【BJT\_Model】可以打开【Bipolar Transistor Model:1】对话框,由【Bipolar Transistor Model:1】对话框可以查看该晶体管的参数。晶体管模型及其【Bipolar Transistor Model:1】对话框如图 4.15 所示。



BJT\_Model  
Q34MOD  
NPN=yes  
PNP=no  
C2=  
Ke=  
Kc=  
C4=  
Cbo=  
Gbo=  
Vbo=  
Rov=  
Rcm=  
Dope=  
Cex=  
Cco=  
Imelt=

Rbno=  
RbModel=MDS  
Trise=  
AllParams=

(a) 原理图上的晶体管模型



(b) “晶体管模型参数设置”对话框

图 4.15 BJT 晶体管模型及其参数设置对话框

如果用户自己搭建原理图,在原理图中插入并设置 BJT 晶体管参数的步骤如下。

① 在原理图的元件面板列表上,选择 BJT 晶体管元件【Devices-BJT】项,元件面板上出现与 BJT 晶体管对应的元件图标,如图 4.16 所示。

② 在图 4.16 所示的元件面板上,分别选择 BJT\_NPN 元件和 BJT\_M 元件插入原理图画图区,在画图区 BJT\_NPN 元件和 BJT\_M 元件显示为 BJT\_NPN 元件和 BJT\_Model 元件。

③ 双击画图区的 BJT\_Model 元件,打开【Bipolar Transistor Model】对话框,由【Bipolar Transistor Model】对话框可以设置晶体管的参数。

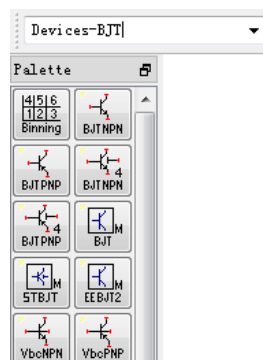
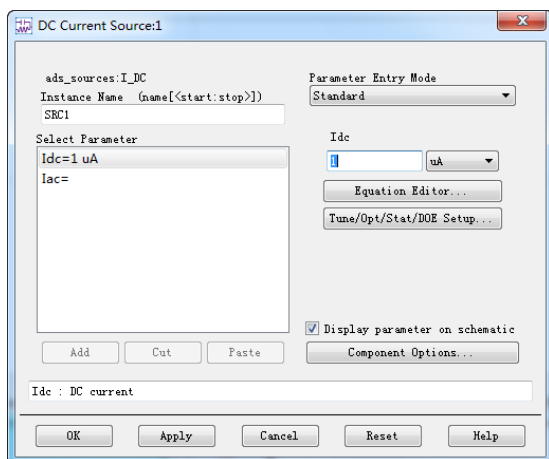


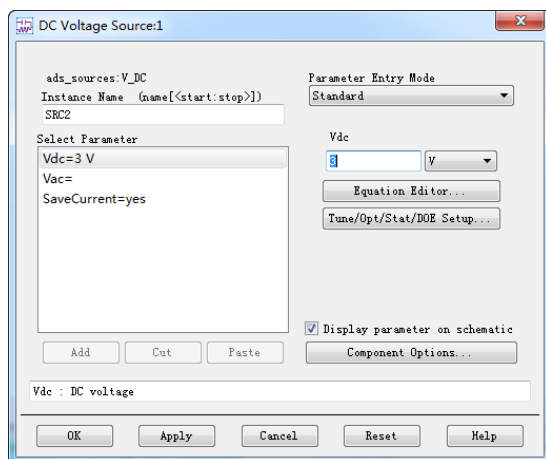
图 4.16 BJT 晶体管元件面板

### (2) 直流电流源和直流电压源。

在图 4.14 所示的单点直流仿真原理图中,有一个直流电流源  $I_{DC}$  和一个直流电压源  $V_{DC}$ ,这两个源的参数已经在原理图中显示出来,其中电流源  $I_{DC}$  的电流为  $1\mu A$ ,电压源  $V_{DC}$  的电压为  $3V$ 。可以通过双击原理图中的直流电流源或直流电压源来查看这两个源的设置方法,这两个源的设置对话框分别为【DC Current Source】和【DC Voltage Source】对话框,如图 4.17 所示。



(a) 直流电流源设置对话框



(b) 直流电压源设置对话框

图 4.17 直流电流源和直流电压源设置

如果用户自己搭建原理图，在原理图中插入并设置直流电流源或直流电压源的步骤如下。

① 在原理图的元件面板列表上，选择频域源元件【Sources-Freq Domain】项，元件面板上出现与频域源对应的元件图标，如图 4.18 所示。

② 在图 4.19 所示的元件面板上，选择 I\_DC 元件或 V\_DC 元件，插入原理图的画图区。

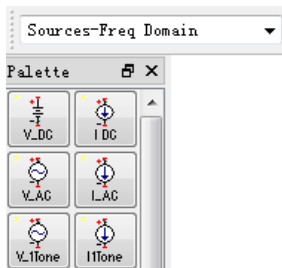


图 4.18 频域源元件面板

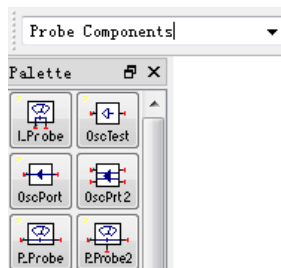


图 4.19 探测元件面板

③ 双击画图区的 I\_DC 元件，打开【DC Current Source】对话框，由【DC Current Source】对话框可以设置直流电流源的参数。双击画图区的 V\_DC 元件，打开【DC Voltage Source】对话框，由【DC Voltage Source】对话框可以设置直流电压源的参数。

(3) 电流指示表。

在图 4.14 所示的单点直流仿真原理图中，有一个电流指示表 I\_Probe，电流指示表 I\_Probe 用来显示电流值，电流指示表被认为内阻为零，一般不需要设置。

如果用户自己搭建原理图，在原理图中插入电流指示表的步骤如下。

① 在原理图的元件面板列表上，选择探测元件【Probe Components】项，元件面板上出现与探测对应的元件图标，如图 4.19 所示。


② 在图 4.19 所示的元件面板上，选择 I\_Probe 元件插入到原理图的画图区，I\_Probe 元件为电流指示表，用来指示插入点处的电流。

(4) 直流仿真控制器。

在图 4.14 所示的单点直流仿真原理图中，有直流仿真控制器 DC，直流仿真控制器 DC 用来设置直流仿真的参数，这里直流仿真控制器已经完成设置。

### 3) 原理图仿真及其仿真结果显示

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果, 查看仿真结果的步骤如下。

① 在单点直流仿真原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。

② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 仿真结果显示的方式是设定好的, 数据显示视窗会自动显示仿真结果, 如图 4.20 所示。

freq	DC1..Vc	DC1..Vb	DC1..I Probe1.i
0.0000 Hz	3.000 V	678.8 mV	61.02 uA

图 4.20 单点直流仿真的结果显示

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中, 可以直接查看, 查看的步骤如下。

① 在单点直流仿真原理图视窗中, 选择【Window】→【Open Data Display】命令, 弹出【Open Data Display】对话框, 如图 4.21 所示。

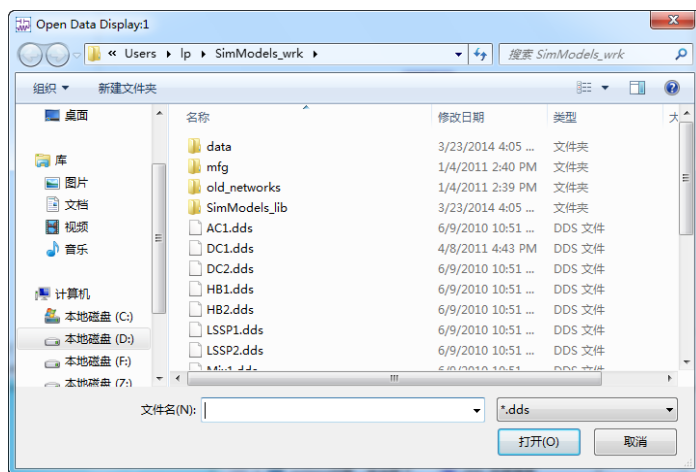


图 4.21 查找数据显示文件的对话框

② 在【Open Data Display】对话框中, 单击【DC1.dds】项, 选择查看单点直流仿真原理图的仿真结果, 然后单击对话框中的【打开】按钮, 关闭对话框。

③ 当【Open Data Display】对话框关闭后, 图 4.20 所示的仿真结果会自动弹出。

(3) 在单点直流仿真原理图的各个节点上, 可以查看电压和电流值, 查看的步骤如下。

① 在单点直流仿真原理图视窗中, 选择【Simulate】→【Annotate DC Solution】命令。

② 单点直流仿真原理图上会自动显示各个节点处的电压和电流值, 这时单点直流仿真原理图如图 4.22 所示。

③ 在单点直流仿真原理图上, 选择【Simulate】→【Clear DC Annotate】命令, 可以清除原理图上各个节点处电压和电流的标值, 使原理图由图 4.22 的形式回到图 4.14 的形式。

## 2. 带变量扫描的直流仿真例程

### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗, 打开带变量扫描直流仿真例程原理图的步骤, 与打开单点直流仿真例程

原理图的步骤相同, SimModels\_wrk 工作空间中的子空间 DC2 的原理图文件 schematic 为带变量扫描直流仿真的原理图, 打开带变量扫描直流仿真例程原理图的步骤如下。

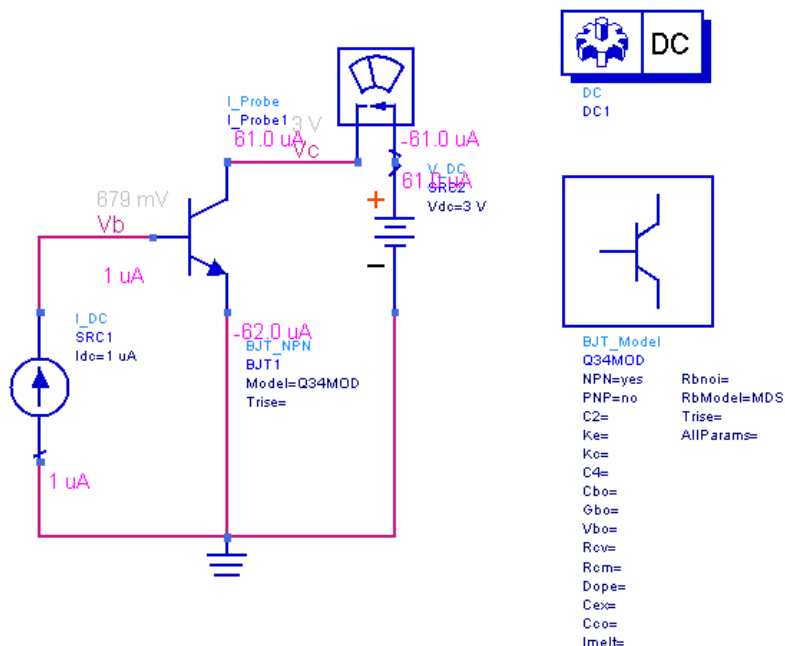


图 4.22 单点直流仿真电路上各节点的电压和电流值

(1) 进入项目浏览区, 展开设计 DC2, DC2 下的 schematic 文件为带变量扫描的直流仿真原理图。

(2) 双击 DC2 下的 schematic 文件, 打开带变量扫描的直流仿真原理图。带变量扫描的直流仿真原理图如图 4.23 所示。

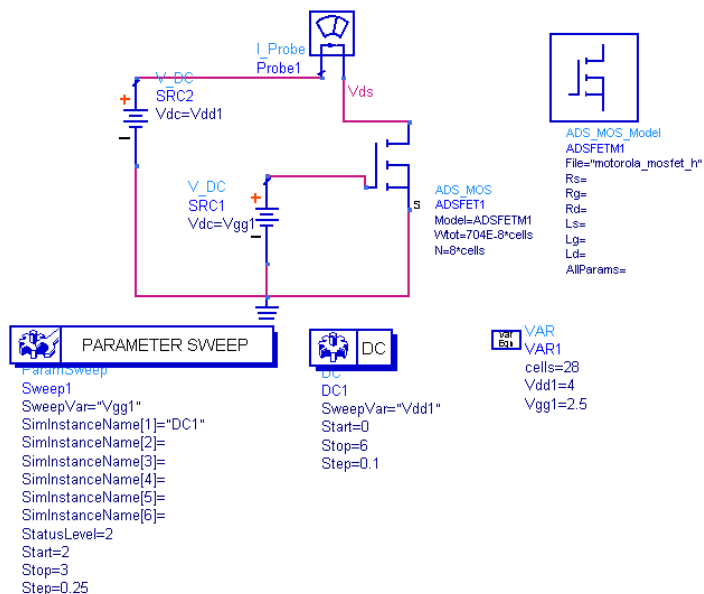


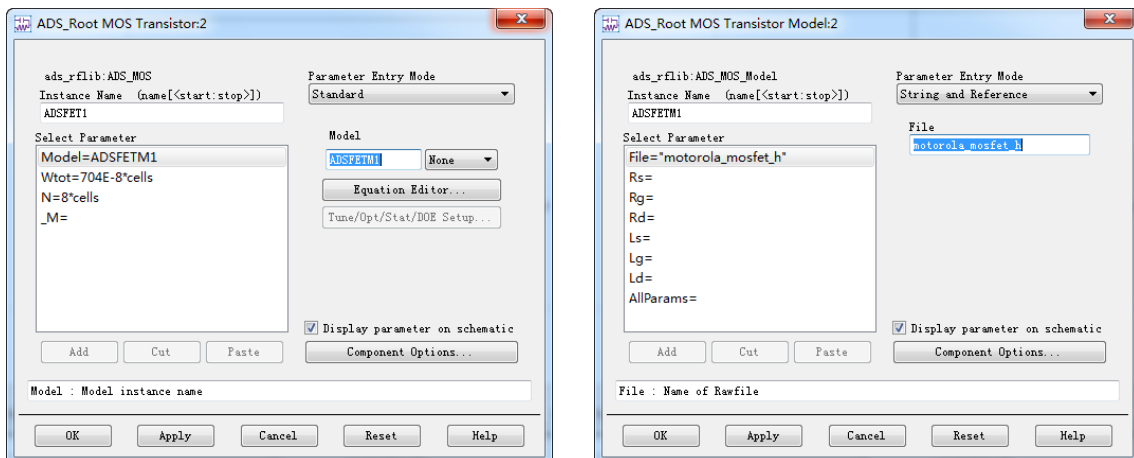
图 4.23 带变量扫描的直流仿真原理图

## 2) 原理图说明

带变量扫描的直流仿真原理图由场效应管、两个直流电压源、电流指示表、直流仿真控制器、参数扫描控制器和变量控件构成，下面对上述构成元件加以说明。

### (1) 场效应管。

在带变量扫描的直流仿真原理图的电路中，场效应晶体管没有子电路，这个晶体管的参数是由电路中的场效应晶体管 ADS\_MOS 和电路旁边的晶体管模型 ADS\_MOS\_Model 设定的，分别双击 ADS\_MOS 和 ADS\_MOS\_Model 可以打开各自设置的对话框，对话框如图 4.24 所示。



(a) 场效应管参数设置对话框

(b) 场效应管模型参数设置对话框

图 4.24 原理图中场效应管参数设置对话框

如果用户自己搭建原理图，在原理图中插入并设置场效应晶体管参数的步骤如下。

① 在原理图的元件面板列表上，选择 MOS 管元件【Devices-MOS】项，元件面板上出现与 MOS 晶体管对应的元件图标，如图 4.25 所示。

② 在图 4.25 所示的元件面板上，分别选择 ADSMOS 元件和 ADSMOS-M 元件插入到原理图的画图区，在画图区 ADSMOS 和 ADSMOS-M 元件显示 ADS\_MOS 和 ADS\_MOS\_Model 元件。

③ 双击画图区的 ADS\_MOS 和 ADS\_MOS\_Model 元件，可以打开对话框，由对话框可以设置晶体管的参数。

### (2) 直流电压源。

在带变量扫描的直流仿真原理图的电路中，有两个直流电压源 V\_DC，这两个源的参数已经在原理图中显示出来。这里需要说明的是，这两个直流电压源的电压值是变量，电压值分别用 Vdd1 和 Vgg1 表示，Vdd1 的变化范围在直流仿真控制器 DC 中设置，Vgg1 的变化范围在参数扫描控制器 PARAMETER SWEEP 中设置。

### (3) 电流指示表。

在带变量扫描的直流仿真原理图的电路中，有一个电流指示表 I\_Probe，电流指示表 I\_Probe 用来显示电流值，电流指示表被认为内阻为 0，一般不需要设置。

### (4) 直流仿真控制器。

在带变量扫描的直流仿真原理图的电路中，有直流仿真控制器 DC，直流仿真控制器的扫描参数用来设置电压值 Vdd1，其余参数保持默认状态。双击直流仿真控制器 DC，可以打开直流仿真控制器的设置对话框，如图 4.26 所示。

由图 4.26 可以看出, 直流仿真控制器的扫描参数如下。

- ① 扫描的变量为  $V_{dd1}$ 。
- ② 扫描的类型为线性。
- ③ 扫描的起始值为 0。
- ④ 扫描的终止值为 6。
- ⑤ 扫描的间隔为 0.1。

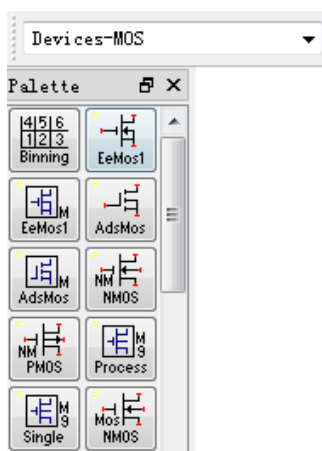


图 4.25 MOS 管元件面板

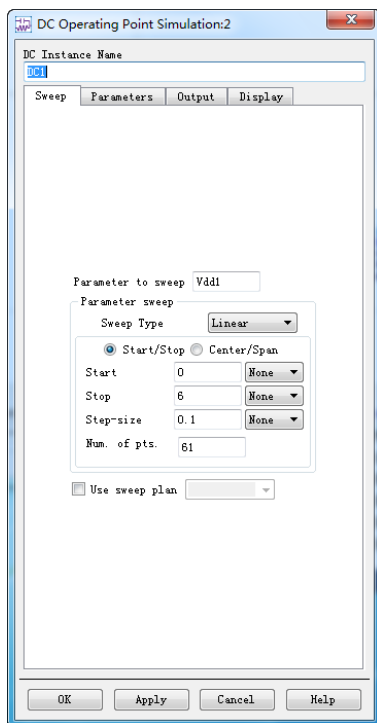


图 4.26 直流仿真控制器设置对话框中的扫描参数

#### (5) 参数扫描控制器。

在带变量扫描的直流仿真原理图的电路中, 有参数扫描控制器 PARAMETER SWEEP, 参数扫描控制器的扫描参数用来设置电压值  $V_{gg1}$ , 其余参数保持默认状态。双击参数扫描控制器 PARAMETER SWEEP, 可以打开参数扫描控制器的设置对话框, 如图 4.27 所示。

由图 4.27 可以看出, 参数扫描控制器的扫描参数如下。

- ① 扫描的变量为  $V_{gg1}$ 。
- ② 扫描的类型为线性。
- ③ 扫描的起始值为 2。
- ④ 扫描的终止值为 3。
- ⑤ 扫描的间隔为 0.25。

#### (6) 变量控件。

在带变量扫描的直流仿真原理图的电路中, 有变量控件 VAR, 原理图中的所有变量都在变量控件 VAR 中显示, 同时变量控件 VAR 设置所有变量的

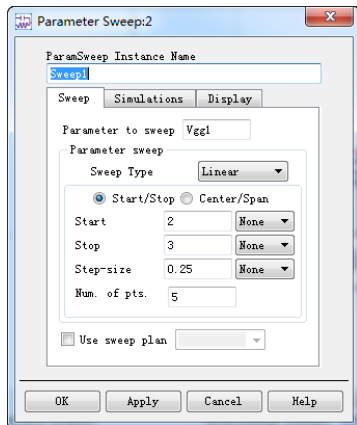



图 4.27 参数扫描控制器设置对话框中的扫描参数

默认值。在带变量扫描的直流仿真原理图的电路中，有 Cells、Vdd1 和 Vgg1 三个变量，这三个变量的默认值分别表示如下。

- ① Cells=28，表示 Cells 的默认值为 28。
- ② Vdd1=4，表示 Vdd1 的默认值为 4。
- ③ Vgg1=2.5，表示 Vgg1 的默认值为 2.5。

### 3) 原理图仿真及其仿真结果显示

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果，查看仿真结果的步骤如下。

- ① 在带变量扫描的直流仿真原理图的工具栏中单击  按钮，运行仿真。
- ② 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，仿真结果显示的方式是设定好的，数据显示视窗会自动显示仿真结果，如图 4.28 所示。

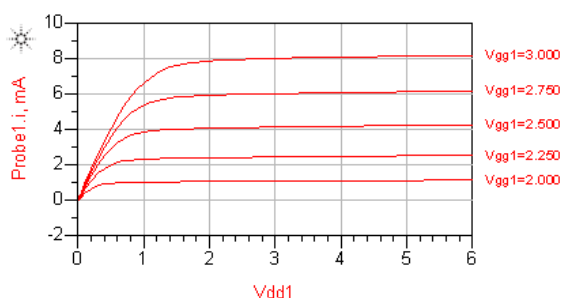


图 4.28 带变量扫描直流仿真的结果显示

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中，可以直接查看，查看的步骤如下。

- ① 在带变量扫描的直流仿真原理图视窗中，选择【Window】→【Open Data Display】命令，弹出【Open Data Display】对话框。
- ② 在【Open Data Display】对话框中，单击【DC2.dds】项，选择查看带变量扫描的直流仿真原理图的仿真结果，然后单击对话框中的【打开】按钮，关闭对话框。
- ③ 当【Open Data Display】对话框关闭后，图 4.28 所示的仿真结果会自动弹出。

## 4.3 交流仿真

交流仿真是针对射频电路小信号进行仿真，可以获得小信号的电压增益、电流增益和跨导等传输参数，并具有噪声分析的功能。本节将介绍交流仿真的基本功能，主要介绍交流仿真面板、交流仿真控件、仿真的相关参数和参数的设置方法等有关交流仿真的基本内容。

### 4.3.1 仿真界面

ADS 原理图中有专门针对交流仿真的元件面板，如图 4.29 所示，元件面板中列出了交流仿真的所有仿真控件。

在图 4.29 所示的交流仿真面板上，有多个交流仿真控件，下面将对这多个交流仿真控件分别加以说明。



### 1. 交流仿真控制器 (AC)

交流仿真控制器是控制交流仿真的最主要控件,使用交流仿真控制器可以设置交流仿真的频率扫描范围和噪声分析等相关参数。

### 2. 交流仿真设置控制器 (Options)

交流仿真设置控制器主要用来设置交流仿真的外部环境和计算方式,例如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件的特性等相关内容。

### 3. 参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)

参数扫描计划控制器主要用来控制仿真中的参数扫描计划,用户可以通过这个控制器添加一个或多个扫描变量,并制定相应的扫描计划。

### 4. 参数扫描控制器 (Parameter Sweep)

参数扫描控制器用来控制仿真中的扫描参数,这个扫描参数可以对多个仿真的仿真实例进行扫描。

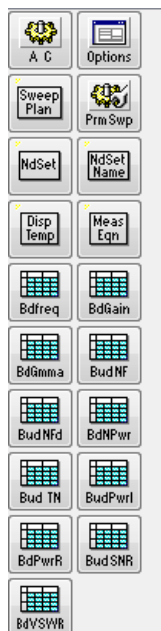


图 4.29 交流仿真面板

### 5. 节点设置 (NdSet) 与节点名 (NdSet Name) 控件

节点设置与节点名控件用来设置交流仿真的相关节点以及节点名称,并可以设置插入节点处的参考电压等。

### 6. 显示模板控件 (Display Template)

显示模板控件用来设置显示模板,显示模板用来设置仿真结果的显示方式。

### 7. 仿真测量等式控件 (MeasEqn)

仿真测量等式控件用来添加一个或多个仿真测量等式,在仿真结束后,这个等式的结果将包含在仿真结果的数据组中。

### 8. 预算控件

交流仿真中的预算控件实质上都是测量方程,用来预算交流仿真中的各种参数。交流仿真中的预算控件包括频率预算控件、反射系数预算控件、增益预算控件、噪声系数预算控件、噪声功率预算控件、噪声系数相位预算控件、等效输出噪声温度预算控件、入射功率预算控件、反射功率预算控件、信噪比预算控件和驻波比预算控件。这里需要说明的是,上述预算控件必须在交流仿真控制器中选中【Perform Budget Simulation】时,才能起作用。

## 4.3.2 仿真操作

在执行交流仿真前,需要对交流仿真控件的参数进行设置,软件是根据各个参数来执行仿真的。在交流仿真的多个控件中,只有交流仿真控制器(AC)是必须要设置的,其他控件根据需要进行设置。下面介绍交流仿真中的相关参数,并给出设置参数的方法。




## 1. 交流仿真控制器

在进行交流仿真前, 需要将交流仿真控制器 (AC) 插入到原理图中并进行设置, 下面给出交流仿真控制器各个参数的设置方法和含义。

### 1) 交流仿真控制器参数设置的操作步骤

① 在原理图的元件面板列表上, 选择交流仿真【Simulation-AC】项, 元件面板上出现交流仿真的多个控件图标。

② 在交流仿真元件面板上, 单击交流仿真控制器 (AC), 然后再单击原理图的画图区, 将交流仿真控制器插入原理图的画图区。单击工具栏中的  按钮, 结束当前命令。这时原理图如图 4.30 所示, 这是交流仿真控制器的默认状态在进行交流仿真前, 需要对图 4.30 所示的交流仿真控制器进行设置。

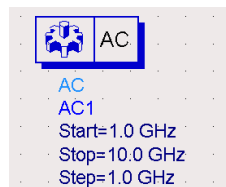
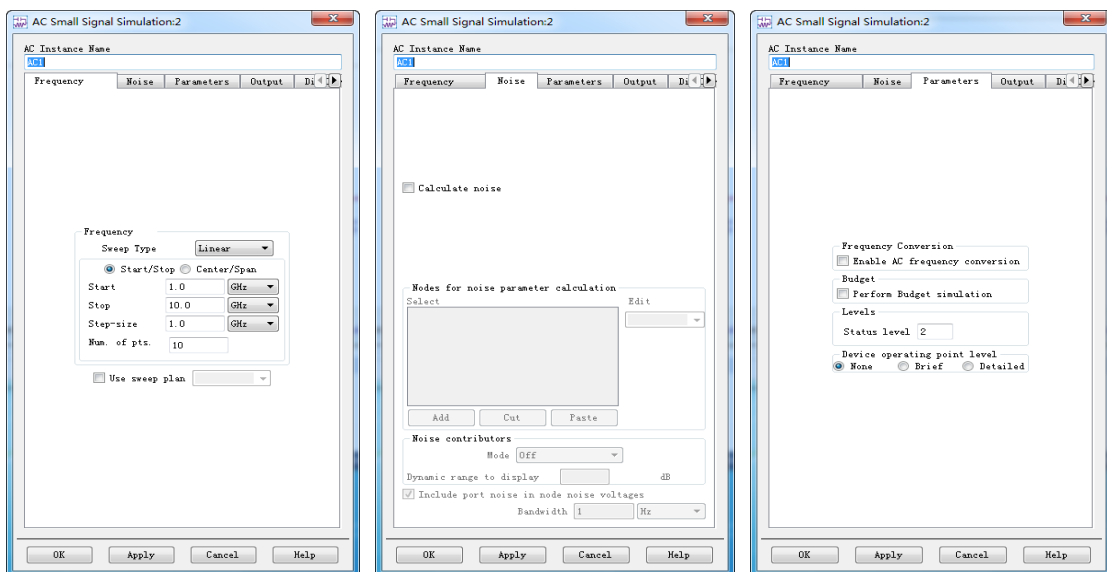


图 4.30 原理图中交流仿真数设置

③ 双击原理图画图区的交流仿真控制器 (AC), 出现【AC Small Signal Simulation】对话框, 对话框中有【Frequency】、【Noise】、【Parameters】、【Output】和【Display】项, 在对话框中可以对这些项进行参数设置。【AC Small Signal Simulation】对话框中的【Frequency】(频率控制器的默认状态参量)、【Noise】(噪声参量) 和【Parameters】(仿真参量) 项, 如图 4.31 所示。



(a) 频率参量设置界面

(b) 噪声参量设置界面

(c) 仿真参量设置界面

图 4.31 交流仿真控制器的参量设置界面

### 2) 交流仿真控制器中参数的含义和设置方法

交流仿真控制器中需要对频率参量、噪声参量和仿真参量等进行设置, 下面分别列表对频率参量、噪声参量和仿真参量加以描述。

(1) 频率参量。交流仿真是在一个频率范围内执行的, 频率参量给出了交流仿真的频率范围等。频率参量在交流仿真控制器设置窗口中的【Frequency】项中设置, 频率参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.5 所示。

表 4.5 频率参量

参数名称	参数描述	备注
Sweep Type	频率扫描类型	Single Point 为单点频率仿真 Linear 为频率线性扫描 Log 为频率对数扫描
Start/Stop 或 Center/Span	频率扫描范围设定类	Start/Stop 表示频率扫描范围由起始值和终止值确定 Center/Span 表示频率扫描范围由中心值和取值范围确定
Start	频率扫描参数的起始值	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Start/Stop 时有效
Stop	频率扫描参数的终止值	仅在扫描范围设定类型选择为 Start/Stop 时有效
Step-size	频率扫描参数的间隔	仅在频率扫描范围设定类型为 Linear 时有效
Center	频率扫描参数的中心值	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Center/Span 时有效
Span	频率扫描参数的范围	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Center/Span 时有效
Pts./decade	频率每增加 10 倍扫描的点数	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Log 时有效
Num. of pts	频率扫描参数的点数	在给定 Start、Stop 和 Step-size (Pts./decade) 后, 系统自动生成
Use sweep plan	是否使用扫描计划	如果选择使用扫描计划, 必须添加“SWEEP PLAN”控件, 并在控件中进行相应的设置

(2) 噪声参量。噪声参量用来设置与噪声相关的参数, 噪声参量主要包含是否允许噪声分析、用于噪声分析的节点名称、选择噪声来源、设置噪声显示的动态范围和噪声带宽等。噪声参量在交流仿真控制器设置窗口中的【Noise】项中设置, 噪声参数设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.6 所示。

表 4.6 噪声参量

参数名称	参数描述	备注
Calculate noise	是否执行噪声分析	如果选择不执行噪声分析, 其他噪声参数设置无效
Edit	选择需要显的节点名称	节点名称必须在原理图中加以定义
Noise contributors	噪声来源分析方法	Off: 不选择任何噪声来源 Sort by value: 噪声来源按照产生噪声的大小排列。低于用户规定的门限值的噪声不被列出, 非线性器件的各种噪声按照它们的类别分别被列出噪声来源的分析方法 Name: 噪声来源按照噪声的名称排列 Sort by value with no device details: 噪声来源按照产生噪声的大小排列, 低于用户规定的门限值的噪声不被列出。与 Sort by value 不同的是, 非线性器件只是列出了各类噪声的总和 Sort by name with no device details: 噪声来源按照噪声的名称排列。与 Sort by name 不同的是, 非线性器件只是列出了各类噪声的总和
Dynamic range to display	噪声动态范围	表示当噪声来源产生的噪声功率小于总噪声减去此参数时, 当前噪声源将不被显示出来。这个参数的单位为 dB
Bandwidth	噪声分析带宽	默认值为 1Hz

(3) 仿真参量。交流仿真参量用来设置交流仿真的频率转换、预算执行、仿真状态信息显示和仿真结果保存等参数。交流仿真参量设置与直流仿真参量设置的内容基本相同, 因此这里只介绍直流仿真参量设置中没有的【Enable AC frequency conversion】(交流频率变换)项和【Perform Budget Simulation】(执行预算仿真)项。交流仿真参量在交流仿真控制器设置窗口中的【Parameters】项中设置, 交流仿真参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.7 所示。

表 4.7 仿真参量

参数名称	参数描述	备注
Enable AC frequency conversion	允许频率转换	此选项决定了是否允许频率的转换，如果选中此项，就可以执行一个带有频率转换的交流仿真
Perform Budget Simulation	执行预算仿真	此选项决定了是否执行预算仿真，如果选中此项，将在交流仿真的过程中执行预算仿真
其他参量设置选项		与直流仿真中的相应选项意义和功能相同

### 3) 交流仿真控制器参数的显示

当设置完成交流仿真控制器中的参数后，可以在原理图中将设置结果显示出来。显示设置结果的操作步骤如下。

(1) 双击原理图画图区的交流仿真控制器（AC），出现【AC Small Signal Simulation】对话框。

(2) 对话框中的【Display】项，用来显示设置完成的参数。如果希望显示某参量，需要选中某参数，如图 4.32 所示。

(3) 单击【OK】按钮，关闭对话框，完成原理图中交流仿真控制器的设置。如果将【AC Small Signal Simulation】对话框中 Display 项的所有参数都选中，原理图中会显示出交流仿真控制器的所有参数，如图 4.33 所示。

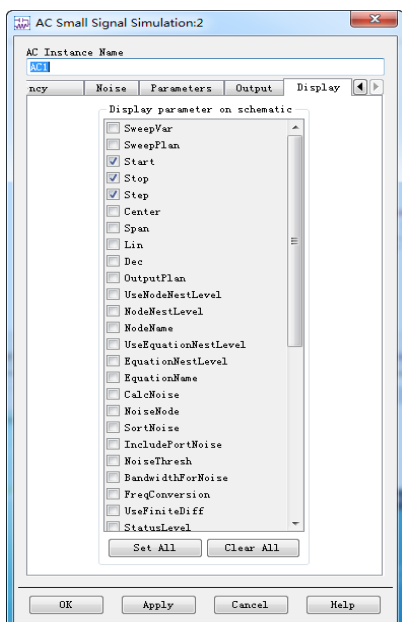


图 4.32 交流仿真控制器中的显示项界面



图 4.33 原理图中显示所有参量的交流仿真控制器

图 4.30 与图 4.33 都是插入原理图中的交流仿真控制器，图 4.30 是未设置的状态，图 4.33 是设置后的状态。实际上，大多数交流仿真控制器只有少数参量需要设置，大部分参量都保持默认状态。

## 2. 交流预算控件

用同样的方法可以设置并显示交流预算控件，原理图中的交流预算控件如图 4.34 所示，

图中显示了所有交流预算控件可以设置的参量。图 4.34(a)~图 4.34(k)分别为原理图中的频率预算控件、反射系数预算控件、增益预算控件、噪声系数预算控件、噪声功率预算控件、噪声系数相位预算控件、等效输出噪声温度预算控件、入射功率预算控件、反射功率预算控件、信噪比预算控件和驻波比预算控件。



图 4.34 原理图中的交流预算控件

### 3. 其他交流仿真控件

其他交流仿真控件包括交流仿真设置控制器 (Options)、参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)、参数扫描控制器 (Parameter Sweep)、节点设置 (Ndset) 控件、节点名 (NdsetName) 控件、显示模板控件 (Display Template) 和仿真测量等式控件 (MeasEqn), 这些交流仿真中的控件与直流仿真中的相应控件意义和功能基本相同, 这里不再赘述。


#### 4.3.3 仿真例程

ADS 软件有一个自带的交流仿真例程, 这个交流仿真例程用于分析一个放大器, 交流仿真例程给出了这个放大器的原理图, 并仿真了放大器的输出电压和线性噪声。本节将给出交流仿真例程的原理图, 并将原理图的仿真结果显示出来。

##### 1. 交流仿真例程原理图

###### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗打开交流仿真例程原理图, 打开原理图的步骤如下。

- (1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。
  - (2) 在 ADS 主视窗，单击工具栏的  按钮，在文件管理区可以看到 examples 文件夹及其内容，文件夹内是所有的例程。
  - (3) 双击 examples 文件夹中的 Tutorial 文件夹，进入 Tutorial 文件夹。
  - (4) 双击 Tutorial 文件夹中的 SimModels\_wrk.7zads，将其解压到当前工作目录。
  - (5) 此时在项目浏览区可以看到 SimModels\_wrk 下所有的设计，schematic 为原理图文件。
- SimModels\_wrk 工作空间中的设计 AC1 为交流仿真。

(6) 单击项目浏览区的 AC1，将其展开。出现 AC1 的 schematic 文件，再双击该文件，就可以打开交流仿真原理图了。交流仿真原理图如图 4.35 所示。

## 2) 原理图说明

交流仿真原理图由 BJT 晶体管、直流电压源、交流电压源、电阻、电容、直流仿真控制器和交流仿真控制器构成，下面对上述构成元件加以说明。

### (1) BJT 晶体管。

交流仿真原理图中的 BJT 晶体管，与图 4.14 所示的单点直流仿真原理图中的 BJT 晶体管相同，都是 Q34MOD 模型，这个晶体管没有子电路，晶体管的参数主要由电路旁边的晶体管模型 BJT\_Model 设定，双击【BJT\_Model】可以打开【Bipolar Transistor Model】对话框，由【Bipolar Transistor Model】对话框可以查看该晶体管的参数。

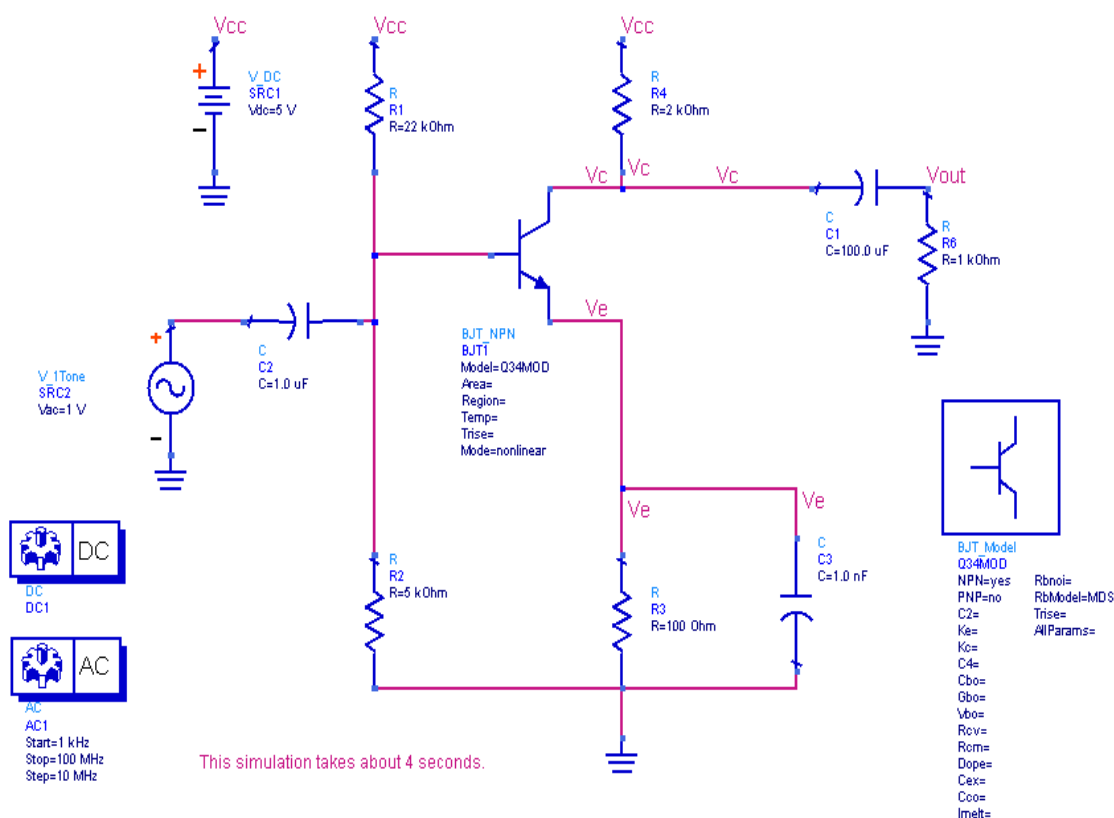


图 4.35 交流仿真原理图

如果用户自己搭建原理图，在原理图中插入并设置 BJT 晶体管参数的步骤如下。

① 在原理图的元件面板列表上, 选择 BJT 晶体管元件【Devices-BJT】项, 元件面板上出现与 BJT 晶体管对应的元件图标。

② 在 BJT 晶体管元件面板上, 分别选择 BJT\_NPN 元件和 BJT-M 元件插入原理图的画图区, 在画图区 BJT\_NPN 元件和 BJT-M 元件显示为 BJT\_NPN 元件和 BJT\_Model 元件。

③ 双击画图区的 BJT\_Model 元件, 打开【Bipolar Transistor Model】对话框, 由【Bipolar Transistor Model】对话框可以设置晶体管的参数。

(2) 直流电压源和交流电压源。

在图 4.35 所示的交流仿真原理图中, 有直流电压源 V\_DC 和交流电压源 V\_1Tone, 这两个源的某些参数已经在原理图中显示出来, 其中直流电压源 V\_DC 的电压为 5V, 交流电压源 V\_1Tone 的电压振幅为 1V。这里需要对交流电压源 V\_1Tone 加以说明, V\_1Tone 表明交流电压源为单频源, 1Tone 为单频, 2Tone 为双频, 以此类推。

如果用户自己搭建原理图, 在原理图中插入并设置直流电压源或交流电压源的步骤如下。

① 在原理图的元件面板列表上, 选择频域源元件【Sources-Freq Domain】项, 元件面板上出现与频域源对应的元件图标。

② 在频域源元件面板上, 选择 V\_DC 元件或 V\_1Tone 元件, 插入到原理图的画图区。

③ 双击画图区的 V\_DC 元件, 打开【DC Voltage Source】对话框, 由【DC Voltage Source】对话框可以设置直流电压源的参数。

④ 双击画图区的 V\_1Tone 元件, 打开【Voltage Source: Single Frequency】对话框, 由【Voltage Source: Single Frequency】对话框可以设置交流电压源的参数。

(3) 电阻和电容。

在图 4.35 所示的交流仿真原理图中, 有电阻和电容, 电阻用来确定直流工作点和交流输出, 电容用来隔直流通交流。

如果用户自己搭建原理图, 在原理图中插入电阻和电容的步骤如下。

① 在原理图的元件面板列表上, 选择集总参数元件【Lumped Components】项, 元件面板上出现集总元件图标。

② 在集总元件面板上, 选择电阻和电容插入到原理图的画图区, 双击画图区的电阻和电容, 打开各自的设置对话框, 可以设置电阻和电容的参数。

(4) 直流仿真控制器。

在图 4.35 所示的交流仿真原理图中, 有直流仿真控制器 DC, 直流仿真控制器 DC 用来设置直流仿真的参数, 这里直流仿真控制器已经完成设置。

(5) 交流仿真控制器。

在图 4.35 所示的交流仿真原理图中, 有交流仿真控制器 AC, 交流仿真控制器 AC 用来设置交流仿真的参数。双击画图区的交流仿真控制器 AC, 打开设置对话框, 可以查看交流仿真控制器的设置情况, 交流仿真控制器频率参量的设置如图 4.36 所示。

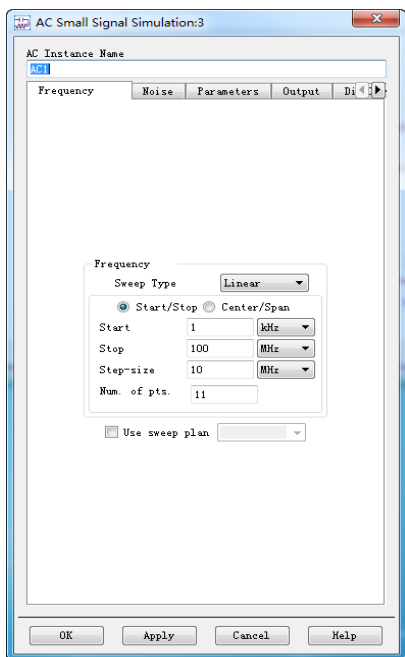


图 4.36 交流仿真控制器频率参量的设置

由图 4.36 可以看出, 交流仿真控制器频率参数的设置如下。

- ① 扫描的类型为线性。
- ② 扫描的起始值为 1kHz。
- ③ 扫描的终止值为 100MHz。
- ④ 扫描的间隔为 10MHz。

## 2. 交流仿真例程的仿真结果

### 1) 查看各节点的直流电压和电流值

在交流仿真原理图的各个节点上, 可以查看电压和电流值, 查看的步骤如下。

(1) 在交流仿真原理图视窗中, 选择【Simulate】→【Annotate DC Solution】命令。

(2) 交流仿真原理图上会自动显示各个节点处的电压和电流值, 这时的交流仿真原理图如图 4.37 所示。

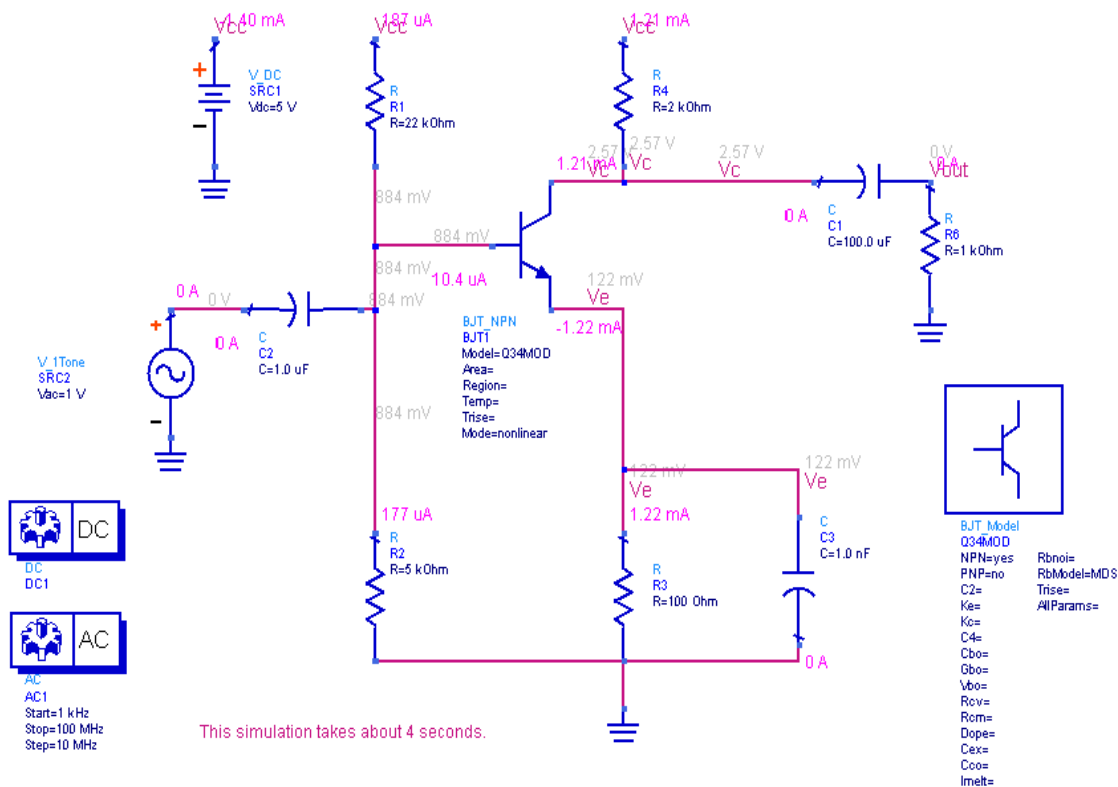


图 4.37 交流仿真电路上各节点的电压和电流值


(3) 在交流仿真原理图上, 选择【Simulate】→【Highlight Node】命令, 弹出【Highlight Node】面板, 面板中有多个节点, 如果选中某个节点, 可以让某个节点高亮, 这可以便于观察节点处的值。【Highlight Node】面板如图 4.38 所示。再次点击即可关闭【Highlight Node】面板。

(4) 在交流仿真原理图上, 选择【Simulate】→【Clear DC Annotate】命令, 可以清除原理图上各个节点处电压和电流的标值, 使原理图由图 4.37 的形式回到图 4.35 的形式。

### 2) 原理图仿真及其仿真结果显示

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果, 查看仿真结果的步骤如下。



- ① 在交流仿真原理图的工具栏中单击按钮，运行仿真。
- ② 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，仿真结果显示的方式是设定好的，数据显示视窗会自动显示仿真结果，如图 4.39 所示。

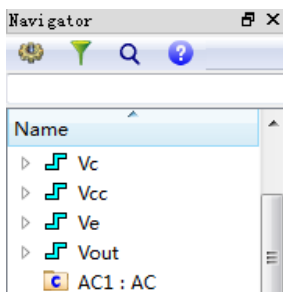


图 4.38 节点高亮面板

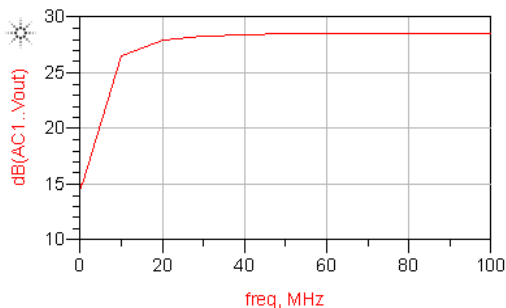


图 4.39 交流仿真的结果显示

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中，可以直接查看，查看的步骤如下。

① 在交流仿真原理图视窗中，选择【Window】→【Open Data Display】命令，弹出【Open Data Display】对话框。

② 在【Open Data Display】对话框中，单击【AC1.dds】项，选择查看交流仿真原理图的仿真结果，然后单击对话框中的【打开】按钮，关闭对话框。

③ 当【Open Data Display】对话框关闭后，图 4.39 所示的仿真结果会自动弹出。

### 3) 查看各噪声来源贡献的噪声分量

仿真实例中没有进行噪声分析，用户自己可以进行相关的设置，然后对原理图进行仿真，来查看各噪声来源贡献的噪声分量。

(1) 在交流仿真例程中查看线性噪声的设置步骤。

① 双击交流仿真原理图中的交流仿真控制器 AC，打开【AC Small Signal Simulation】设置对话框，在对话框中选择噪声【Noise】项。

② 选中【Calculate noise】复选框，执行噪声分析。

③ 在【Edit】选项中，选择需要显示噪声的节点名称【Vout】，然后单击【Add】按钮，在对话框的【Select】框中就加入了节点【Vout】。


④ 在【Noise contributors】选项中，【Mode】选择【Sort by value】，表明噪声来源按照产生噪声的大小排列。

⑤ 在【Dynamic range to display】选项中，设置噪声显示的动态范围为 40dB。

⑥ 单击【OK】按钮，关闭对话框。

完成设置的噪声对话框如图 4.40 所示。

(2) 原理图仿真及查看线性噪声。

① 在交流仿真原理图的工具栏中单击按钮，运行仿真。

② 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗的数据显示方式面板上，选择数据列表显示方式，可以看到各噪声来源贡献的噪声分量，如图 4.41 所示。

③ 当观察完噪声后，不要保存数据，否则会改变交流仿真例程。



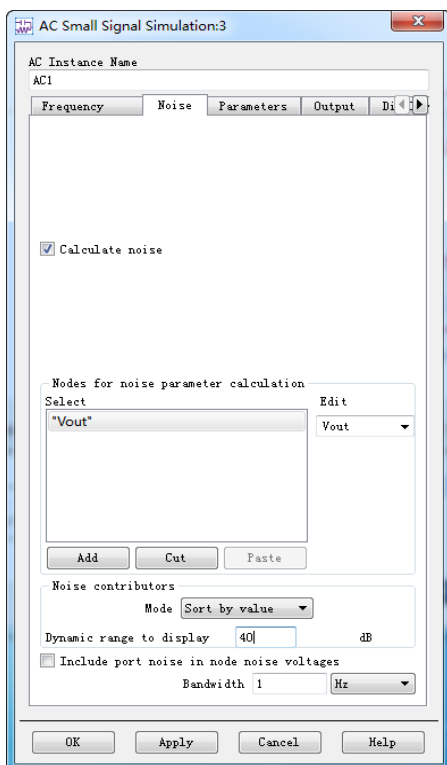


图 4.40 交流仿真控制器中噪声参量的设置

freq	AC.Vout
1.000 kHz	14.478 / -177.131
10.00 MHz	26.523 / -150.956
20.00 MHz	27.964 / -164.233
30.00 MHz	28.298 / -170.476
40.00 MHz	28.418 / -174.205
50.00 MHz	28.471 / -176.822
60.00 MHz	28.497 / -178.860
70.00 MHz	28.508 / 179.440
80.00 MHz	28.512 / 177.956
90.00 MHz	28.510 / 176.617
100.0 MHz	28.504 / 175.382

图 4.41 各噪声来源贡献的噪声分量

## 4.4 S 参数仿真

射频电路的特性主要由 S 参数来表示，所以 S 参数仿真是射频电路最重要的仿真方法。S 参数仿真采用网络的观点观察电路，可以反映射频网络输入和输出端口的行驻波特性和不同端口之间的传输特性。S 参数仿真的另一个特点是采用史密斯圆图来进行匹配，并利用史密斯原图来调整增益、噪声和稳定性。本节将介绍 S 参数仿真的基本功能，主要介绍 S 参数仿真面板、S 参数仿真控件、仿真的相关参数和参数的设置方法等关于 S 参数仿真的基本内容。

### 4.4.1 仿真界面

ADS 原理图中有专门针对 S 参数仿真的元件面板，如图 4.42 所示，元件面板中列出了 S 参数仿真的所有仿真控件。

在图 4.42 所示的 S 参数仿真面板上，有多个 S 参数仿真控件，下面将对这多个 S 参数仿真控件分别加以说明。

#### 1. S 参数仿真控制器 (SP)

S 参数仿真控制器是控制 S 参数仿真的最主要控件，使用 S 参数仿真控制器可以设置 S 参数仿真的频率扫描范围、仿真执行的参数和噪声分析等相关参数。

## 2. S 参数仿真测试平台控件 (SP Lab)

S 参数仿真测试平台控件专门用来建立一个 S 参数仿真的测试平台, 它所包含的参数与 S 参数仿真控制器相同。

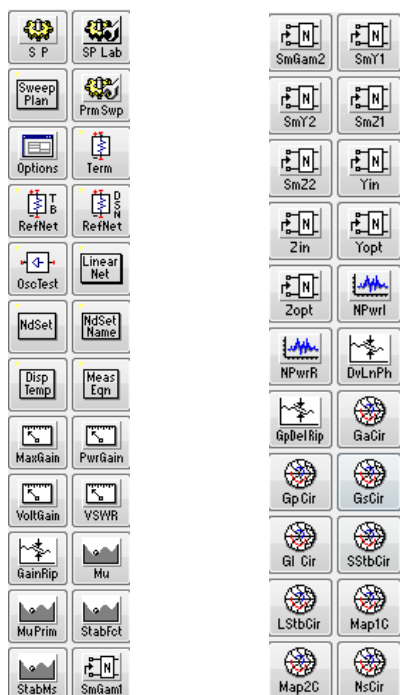


图 4.42 S 参数仿真面板

## 3. 参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)

参数扫描计划控制器主要用来控制仿真中的参数扫描计划, 用户可以通过这个控制器添加一个或多个扫描变量, 并制订相应的扫描计划。

## 4. 参数扫描控制器 (Parameter Sweep)

参数扫描控制器用来控制仿真中的扫描参数, 这个扫描参数可以对多个仿真的仿真实例进行扫描。

## 5. S 参数仿真设置控制器 (Options)

S 参数仿真设置控制器主要用来设置 S 参数仿真的外部环境和计算方式, 如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件的特性等相关内容。

## 6. 终端负载 (Term)

S 参数仿真面板中的终端负载元件用来定义电路端口的标号以及各电路端口的终端负载阻抗。

## 7. 节点设置 (Ndset) 与节点名 (Ndset Name) 控件

节点设置与节点名控件用来设置 S 参数仿真的相关节点以及节点名称。

## 8. 显示模板控件 (Display Template)

显示模板控件用来设置显示模板, 显示模板用来设置仿真结果的显示方式。

## 9. 仿真测量等式控件 (MeasEqn)

仿真测量等式控件用来添加一个或多个仿真测量等式, 在仿真结束后, 这个等式的结果将包含在仿真结果的数据组中。

## 10. 最大增益控件 (MaxGain)

最大增益控件可以用来在仿真结果中添加关于仿真电路最大增益的数据组。

## 11. 功率增益控件 (PwrGain)

功率增益控件可以用来在仿真结果中添加关于仿真电路功率增益的数据组。

## 12. 电压增益控件 (VoltGain)

电压增益控件可以用来在仿真结果中添加关于仿真电路电压增益的数据组。

## 13. 电压驻波比控件 (VSWR)

电压驻波比控件可以用来在仿真结果中添加关于仿真电路各端口电压驻波比的数据组。

## 14. 增益波纹控件 (GainRip)

增益波纹控件可以用来在仿真结果中添加关于仿真电路增益波纹的数据组。

## 15. 稳定性因子控件

射频有源电路存在稳定性问题, 例如低噪声放大器必须在稳定的前提下才能正常工作。元件面板上的 Mu、MuPrim、Stabfct 和 Stabms 是关于有源电路的稳定性因子。

## 16. 反射系数控件

反射系数包括输入反射系数和输出反射系数, 元件面板上的 SmGam1 和 SmGam2 是反射系数。

## 17. 输入导纳和输入阻抗控件

输入导纳 (Yin) 和输入阻抗 (Zin) 控件可以用来在仿真结果中添加关于仿真电路输入导纳和输入阻抗的数据组, 用户在仿真结束后可以直接在数据显示窗口中查看仿真电路或仿真网络的输入导纳和输入阻抗, 并以数据列表或矩形图形的方式表示出来。

## 18. 最佳噪声输入导纳和最佳噪声输入阻抗控件

最佳噪声输入导纳 (Yopt) 和最佳噪声输入阻抗 (Zopt) 是指当噪声系数为最小值时, 输入导纳和输入阻抗的值。

## 19. 史密斯圆图控件

史密斯圆图是射频电路分析中最有效和最直观的工具, 在 S 参数仿真中, ADS 软件提供了各种史密斯圆图工具, 用来分析射频电路的增益、噪声和稳定性。史密斯圆图控件包括等增益圆图、等噪声系数圆图和稳定性圆图等, 通过这些控件在数据显示窗口中可以绘制出各种需要的史密斯圆图。

## 4.4.2 仿真操作


在执行 S 参数仿真前, 需要对 S 参数仿真控件的参数进行设置, 软件是根据各个参数来执行仿真的。在 S 参数仿真的多个控件中, 只有 S 参数仿真控制器 (SP) 是必须要设置的, 其他控件根据需要来决定是否需要设置。下面介绍 S 参数仿真中的相关参数, 并给出设置参数的方法。

### 1. S 参数仿真控制器

在进行 S 参数仿真前, 需要将 S 参数仿真控制器 (SP) 插入到原理图中并进行设置, 下面给出 S 参数仿真控制器各个参数的设置方法和含义。

#### 1) S 参数仿真控制器参数设置的操作步骤

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 元件面板上出现 S 参数仿真的多个控件图标。

(2) 在 S 参数仿真元件面板上, 单击 S 参数仿真控制器 (SP), 然后再单击原理图的画图区, 将 S 参数仿真控制器插入原理图的画图区。单击工具栏中的  按钮, 结束当前命令。这时原理图如图 4.43 所示, 这是 S 参数仿真控制器的默认状态, 在进行 S 参数仿真前, 需要对图 4.43 所示的 S 参数仿真控制器进行设置。

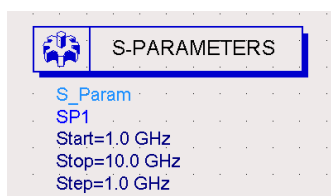


图 4.43 原理图中 S 参数仿真

(3) 双击原理图画图区的 S 参数仿真控制器 (S-PARAMETERS), 出现【Scattering-Parameter Simulation】对话框, 对话框中有 Frequency、Parameters、Noise、Output 和 Display 项, 在对话框中可以对这些项进行参数设置。【Scattering-Parameter Simulation】对话框中的 Frequency (频率控制器的默认状态参量)、Parameters (仿真参量) 和 Noise (噪声参量) 项, 如图 4.44 所示。

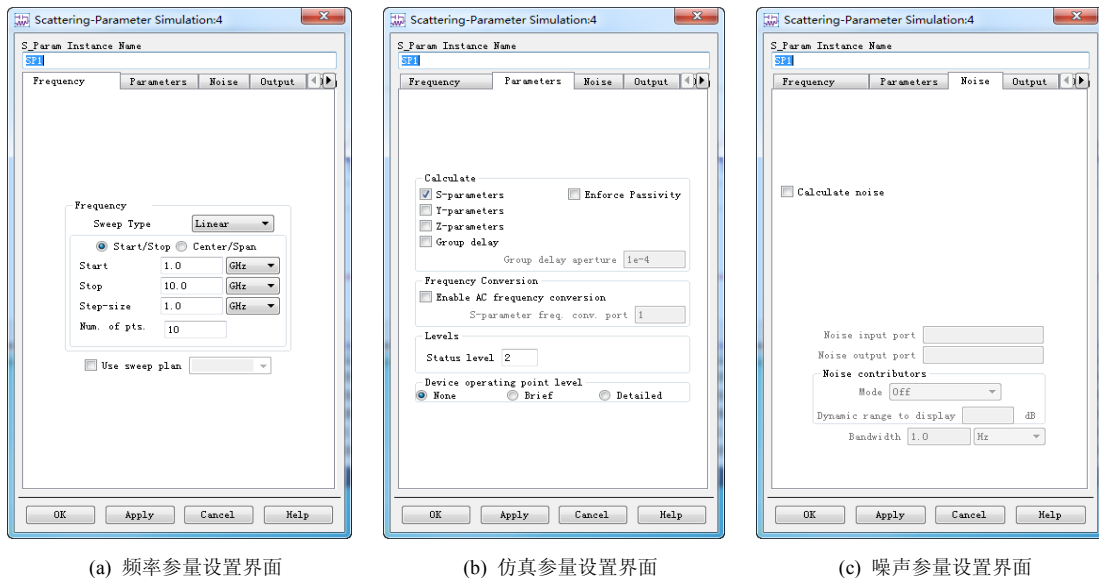


图 4.44 S 参数仿真控制器的参量设置界面

## 2) S 参数仿真控制器中参数的含义和设置方法

S 参数仿真控制器中需要对频率参量、仿真参量和噪声参量等进行设置,下面分别列表对频率参量、仿真参量和噪声参量加以描述。

(1) 频率参量。S 参数仿真是在一个频率范围内执行的,频率参量给出了 S 参数仿真的频率范围等。频率参量在 S 参数仿真控制器设置窗口中的【Frequency】项中设置,频率参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.8 所示。

表 4.8 频率参量

参数名称	参数描述	备注
Sweep Type	频率扫描类型	Single Point 为单点频率仿真 Linear 为频率线性扫描 Log 为频率对数扫描
Start/Stop 或 Center/Span	频率扫描范围设定类型	Start/Stop 表示频率扫描范围由起始值和终止值确定 Center/Span 表示频率扫描范围由中心值和取值范围确定
Start	频率扫描参数的起始值	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Start/Stop 时有效
Stop	频率扫描参数的终止值	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Start/Stop 时有效
Step-size	频率扫描参数的间隔	仅在频率扫描范围设定类型为 Linear 时有效
Center	频率扫描参数的中心值	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Center/Span 时有效
Span	频率扫描参数的范围	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Center/Span 时有效
Pts./decade	频率每增加 10 倍扫描的点数	仅在频率扫描范围设定类型选择为 Log 时有效
Num. of pts	频率扫描参数的点数	在给定 Start、Stop 和 Step-size (Pts./decade) 后,系统自动生成
Use sweep plan	是否使用扫描计划	如果选择使用扫描计划,必须添加“SWEEP PLAN”控件,并在控件中进行相应的设置

(2) 仿真参量。S 参数仿真参量用来设置 S 参数仿真的参数计算、频率转换、仿真状态信息显示和仿真结果保存等参数。S 参数仿真参量在 S 参数仿真控制器设置窗口中的【Parameters】项中设置, S 参数仿真参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.9 所示。

表 4.9 仿真参量

参数名称	参数描述	备注
Calculate	参数计算	此项用来设置仿真过程中需要计算的参数,包括 S 参数、Y 参数、Z 参数和群时延,当选中计算某个参数时,就可以在仿真结果中查看这个参数
Enable AC frequency conversion	允许频率转换	此选项决定了是否允许频率的转换,如果选中此项,就可以执行一个带有频率转换的 S 参数仿真
Status level	设置仿真状态窗口中显示信息多少的参数	0 代表显示很少的仿真信息 1 和 2 表示显示正常的仿真信息 3 和 4 表示显示较多的仿真信息
Device operating point level	保存原理图中有源器件和部分线性器件操作点的设置	None: 不保存 Brief: 仅保存部分参数 Detail: 保存所有仿真的参数

(3) 噪声参量。在 S 参数仿真中同样可以进行噪声分析，S 参数仿真中的噪声参量用来设置与噪声相关的参数，噪声参量主要包含是否允许噪声分析、噪声的输入端口、噪声的输出端口、选择噪声来源、设置噪声显示的动态范围和噪声带宽等。噪声参量在 S 参数仿真控制器设置窗口中的【Noise】项中设置，噪声参数设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.10 所示。

表 4.10 噪声参量

参数名称	参数描述	备注
Calculate noise	是否执行噪声分析	如果选择不执行噪声分析，其他噪声参数设置无效
Noise input port	噪声的输入端口	用来设定噪声分析时噪声的输入端口
Noise output port	噪声的输入端口	用来设定噪声分析时噪声的输出端口
Noise contributors	噪声来源的分析方法	Off: 不选择任何噪声来源 Sort by value: 噪声来源按照产生噪声的大小排列。低于用户规定的门限值的噪声不被列出，非线性器件的各种噪声按照它们的类别分别被列出 Sort by name: 噪声来源按照噪声的名称排列 Sort by value with no device details: 噪声来源按照产生噪声的大小排列，低于用户规定的门限值的噪声不被列出。与 Sort by value 不同的是，非线性器件只是列出了各类噪声的总和 Sort by name with no device details: 噪声来源按照噪声的名称排列。与 Sort by name 不同的是，非线性器件只是列出了各类噪声的总和
Dynamic range to display	噪声显示的动态范围	当噪声来源产生的噪声功率小于总噪声减去此参数时，当前噪声来源将不被显示出来。这个参数的单位为 dB
Bandwidth	噪声分析带宽	默认值为 1Hz

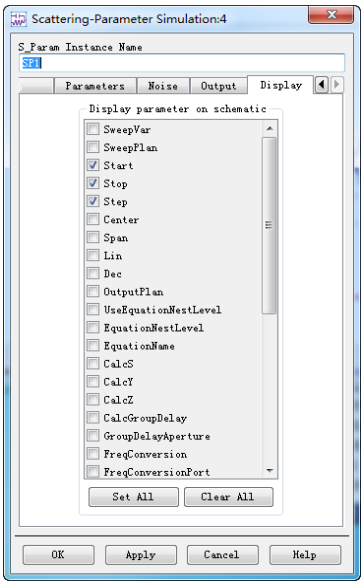


图 4.45 S 参数仿真控制器中的显示项界面

3) S 参数仿真控制器参数的显示

当设置完成 S 参数仿真控制器中的参数后，可以在原理图中将设置结果显示出来。显示设置结果的操作步骤如下。

(1) 双击原理图画图区中的 S 参数仿真控制器 (S-PARAMETERS)，出现【Scattering- Parameter Simulation】对话框。

(2) 对话框中的【Display】项，用来显示设置完成的参数。如果希望显示某参量，需要选中某参数，如图 4.45 所示。

(3) 单击【OK】按钮，关闭对话框，完成原理图中 S 参数仿真控制器的设置。如果将【Scattering- Parameter Simulation】对话框中【Display】项的所有参数都选中，原理图中会显示出 S 参数仿真控制器的所有参数，如图 4.46 所示。

图 4.43 与图 4.46 都是插入原理图中的 S 参数仿真控制器，图 4.43 是未设置的状态，图 4.46 是设置后的状态。实际上，大多数 S 参数仿真控制器只有少数参量需要设置，大部分参量都保持默认状态。

## 2. 终端负载 (Term)

终端负载是 S 参数仿真中最常用的元件之一, 原理图中的终端负载控件如图 4.47 所示, 图中显示的终端负载阻抗为  $50\Omega$ 。

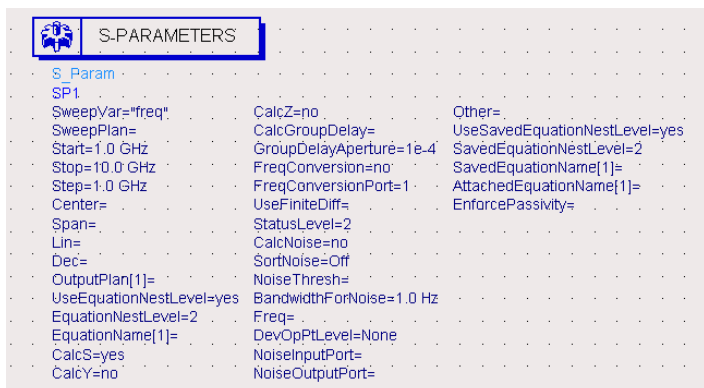


图 4.46 原理图中显示所有参数的 S 参数仿真控制器

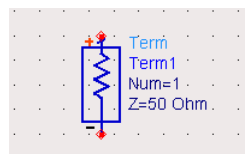
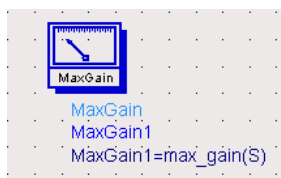


图 4.47 S 参数仿真中的终端负载

## 3. 增益、驻波比和稳定性因子

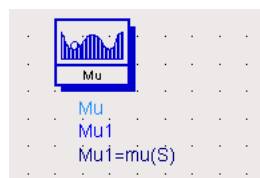
可以设置并显示增益、驻波比、稳定性因子和反射系数控件, S 参数仿真中有多种增益、驻波比、稳定性因子和反射系数控件, 如增益有最大增益、功率增益和电压增益等, 图 4.48 中只给出了一种增益、一种驻波比和一种稳定性因子控件, 图中显示了它们可以设置的参量。



(a) 增益控件



(b) 驻波比控件

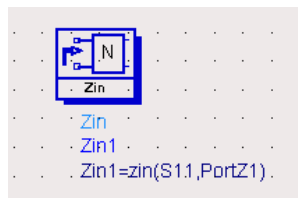


(c) 稳定性因子控件

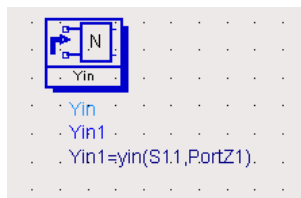
图 4.48 增益、驻波比和稳定性因子控件

## 4. 阻抗和导纳控件

可以设置并显示阻抗和导纳控件, S 参数仿真中有多种阻抗和导纳控件, 例如导纳有输入导纳和最佳噪声输入导纳等, 图 4.49 中只给出一种阻抗和一种导纳的形式, 图中显示了它们可以设置的参量。



(a) 阻抗控件



(b) 导纳控件

图 4.49 阻抗和导纳控件

## 5. 史密斯圆图控件

S 参数仿真中有多种史密斯圆图控件,包括等增益圆图、等噪声系数圆图和稳定性圆图等,图 4.50 中只给出一种等增益圆图、一种等噪声系数圆图和一种稳定性圆图的形式,图中显示了它们可以设置的参数。

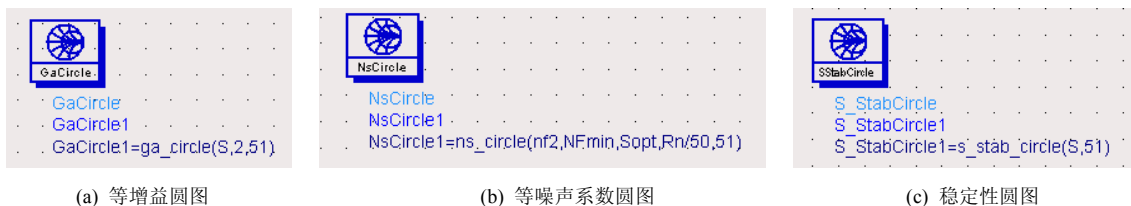


图 4.50 史密斯圆图控件

## 6. 其他 S 参数仿真控件

其他 S 参数仿真控件包括 S 参数仿真设置控制器 (Options)、参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)、参数扫描控制器 (Parameter Sweep)、节点设置 (Ndset) 控件、节点名 (Ndset Name) 控件、显示模板控件 (Display Template) 和仿真测量等式控件 (MeasEqn), 这些 S 参数仿真中的控件与直流仿真中的相应控件意义和功能基本相同, 这里不再赘述。

### 4.4.3 仿真例程

ADS 软件有一个自带的 S 参数仿真例程, 这个例程用于分析一个放大器的小信号 S 参数模型, 本节将给出这个放大器 S 参数仿真例程的原理图, 并仿真该放大器的  $S_{11}$  和  $S_{21}$  等参数, 同时在数据显示视窗将原理图的仿真结果显示出来。

#### 1. S 参数仿真例程原理图

##### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗打开 S 参数仿真例程原理图, 打开原理图的步骤如下。

- (1) 启动 ADS 软件, 弹出主视窗。
- (2) 选择主视窗中的【View】→【Example Directory】选项, 在主视窗的文件管理区可看到 examples 文件夹, 文件夹内是所有的例程。
- (3) 双击 examples 文件夹中的 Tutorial 文件夹, 进入 Tutorial 文件夹。
- (4) 双击 Tutorial 文件夹中的 SimModels\_wrk.7zads, 将其解压到当前工作目录。
- (5) 单击项目浏览区的设计 SP1, 出现 SP1 的 schematic 文件, 双击该文件, 就可以打开 S 参数仿真原理图了。S 参数仿真原理图如图 4.51 所示。


##### 2) 原理图说明

S 参数仿真原理图由放大器模型 Motorola\_PA、终端负载 Term、直流电压源 V\_DC 和 S 参数仿真控制器构成, 下面对上述构成元件加以说明。

##### (1) 放大器模型 Motorola\_PA。

S 参数仿真原理图中的放大器是一个电路模型, Motorola\_PA 是这个电路模型的符号, 在进行 S 参数仿真中, 是针对 Motorola\_PA 符号仿真各相关参数的。Motorola\_PA 符号有子电路, Motorola\_PA 电路模型的特性是由它的子电路决定的, 查看 Motorola\_PA 子电路的步骤如下。



① 在 S 参数仿真原理图中, 单击工具栏中的  按钮, 然后单击原理图中的 Motorola\_PA 符号, 可以查看一个母电路中的子电路内容, Motorola\_PA 符号的子电路内容如图 4.52 所示。

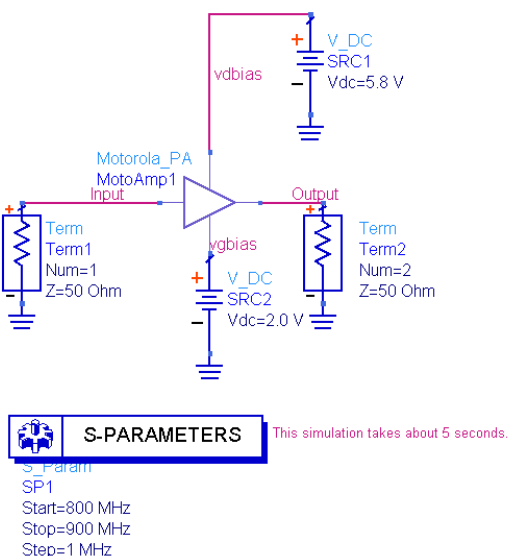



图 4.51 S 参数仿真原理图

② 在图 4.52 所示的 Motorola\_PA 子电路中, 还有一个名为 Motorola\_Mosfet\_Model 的电路符号, 这个电路符号也有子电路, 单击工具栏中的  按钮, 可以查看 Motorola\_Mosfet\_Model 电路符号的子电路, Motorola\_Mosfet\_Model 电路符号的子电路如图 4.53 所示。

③ 在图 4.53 中, 如果单击工具栏中的  按钮, 可以跳出当前子电路, 回到如图 4.52 所示的母电路。

④ 在图 4.52 中, 如果单击工具栏中的  按钮, 可以跳出当前子电路, 回到如图 4.51 所示的母电路。

⑤ Motorola\_PA 电路符号和 Motorola\_Mosfet\_Model 电路符号可以在元件库中查找到, 这两个电路符号也可以在搭建其他电路时使用。

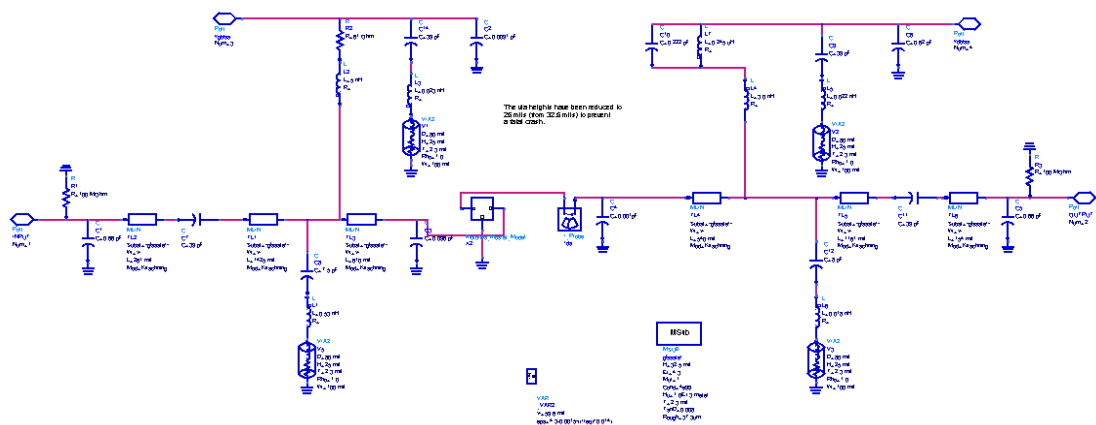


图 4.52 Motorola\_PA 电路符号的子电路

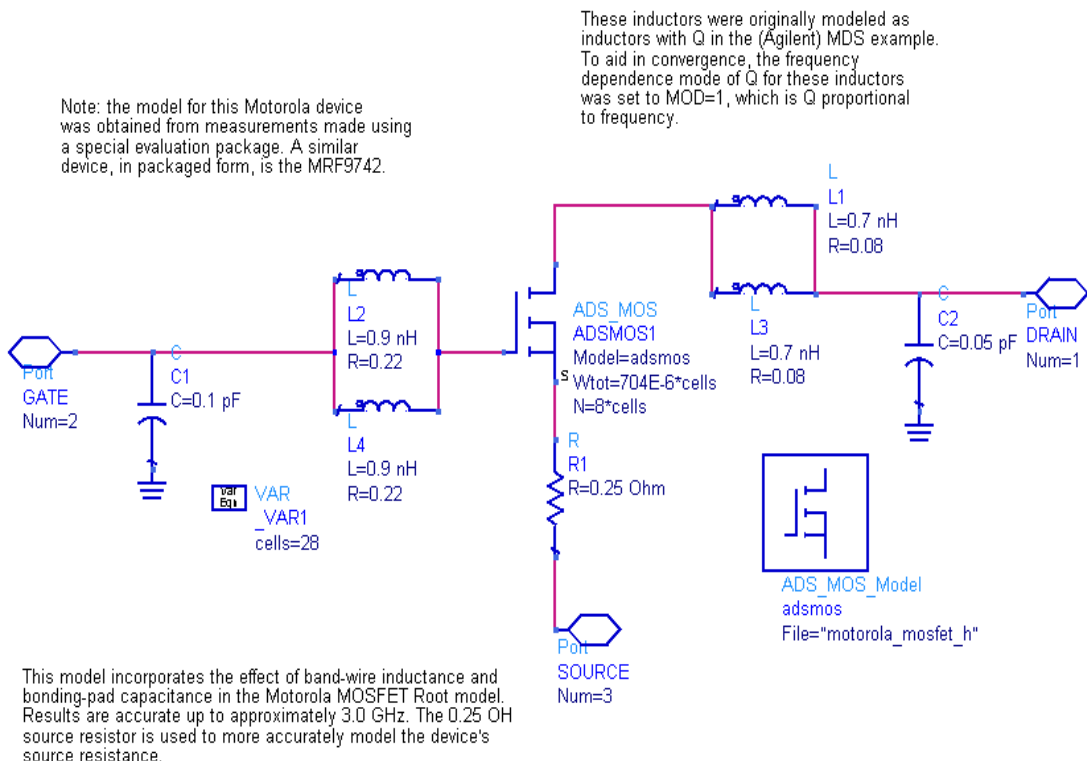


图 4.53 Motorola\_Mosfet\_Model 电路符号的子电路

## (2) 终端负载 Term。

在 S 参数仿真中，各个端口都要加终端负载 Term，这里输入端口设为 Term1，输出端口设为 Term2，这两个端口的特性阻抗都为  $50\Omega$ 。这里需要特别说明的是，电路在进行 S 参数仿真时，电路的输入端口没有加源，而是在输入端口采用终端负载 Term。

## (3) 直流电压源。

在图 4.51 所示的 S 参数仿真原理图中，有两个直流电压源  $V_{DC}$ ，这两个源的某些参数已经在原理图中显示出来，这两个源给放大电路提供静态工作点。

## (4) S 参数仿真控制器。


在图 4.51 所示的 S 参数仿真原理图中，有 S 参数仿真控制器 S-PARAMETERS，S 参数仿真控制器用来设置 S 参数仿真的参数。由图 4.51 可以看出，S 参数仿真控制器频率参量的设置如下。

- ① 扫描的起始值为 800MHz。
- ② 扫描的终止值为 900MHz。
- ③ 扫描的间隔为 1MHz。

## 2. S 参数仿真例程的仿真结果

### 1) 查看默认的仿真结果

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果，查看仿真结果的步骤如下。

① 在 S 参数仿真原理图的工具栏中单击  按钮，运行仿真。

② 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，仿真结果显示的方式是设定好的，数据显示视窗会自动显示仿真结果，如图 4.54 所示。

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中, 可以直接查看, 查看的步骤如下。


① 在 S 参数仿真原理图视窗中, 选择【Window】→【Open Data Display】命令, 弹出【Open Data Display】对话框。

② 在【Open Data Display】对话框中, 单击【SP1.dds】项, 选择查看 S 参数仿真原理图的仿真结果, 然后单击【打开】按钮, 关闭对话框。


③ 当【Open Data Display】对话框关闭后, 图 4.54 所示的仿真结果会自动弹出。

## 2) 查看其他仿真结果

仿真实例中没有给出端口 1 和端口 2 的匹配状况, 由 S11 和 S22 可以查看端口 1 和端口 2 的匹配状况, 下面对原理图进行仿真, 然后在数据显示视窗添加 S11 和 S22 的数据显示。

① 在 S 参数仿真原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。

② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 数据显示视窗如图 4.54 所示, 数据显示视窗中只显示了 S21 曲线。

③ 在数据显示视窗, 单击数据显示方式面板中的  按钮, 然后单击数据显示区, 在数据显示区创建一个直角坐标系的矩形图, 这时会弹出在【Plot Traces & Attributes】对话框, 如图 4.55 所示。由图 4.55 可以看出, 新创建的矩形图可以绘制 S11 和 S22 曲线, 如果还想查看【Plot Traces & Attributes】对话框中没有的其他变量曲线, 可以在原理图中的 S 参数仿真控制器中进行设置。

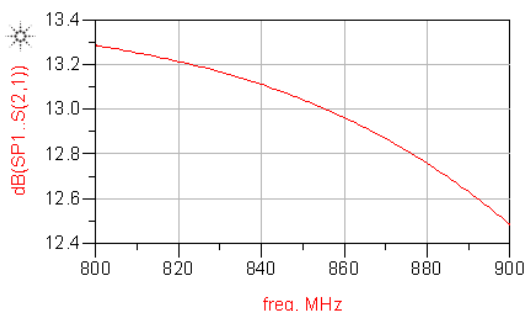


图 4.54 S 参数仿真的结果显示

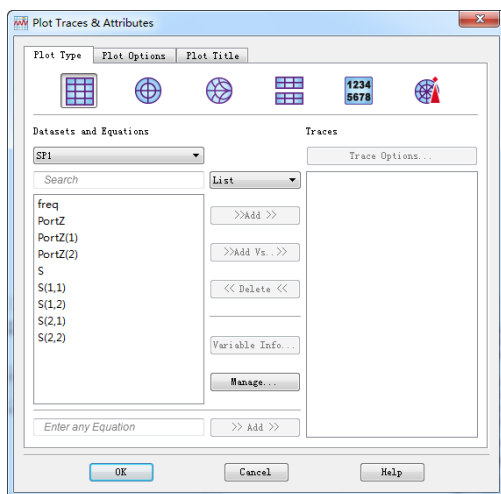


图 4.55 选择绘制曲线变量

④ 在【Plot Traces & Attributes】对话框中, 单击【S (1, 1)】项, 再单击【Add】按钮, 这时又会弹出【Complex Data】对话框。选中【dB】复选框, 单击【OK】按钮关闭这个对话框。再单击【Plot Trace & Attributes】对话框中的【OK】按钮, 也关闭这个窗口, 这时在数据显示视窗出现 S11 曲线。

⑤ 用同样的方法, 在数据显示视窗可以显示 S22 曲线。S11 和 S22 曲线如图 4.56 所示。

由图 4.56 可以看出, 在 800~900MHz 频率范围内, 端口 1 的匹配状况比端口 2 的匹配状况要好。

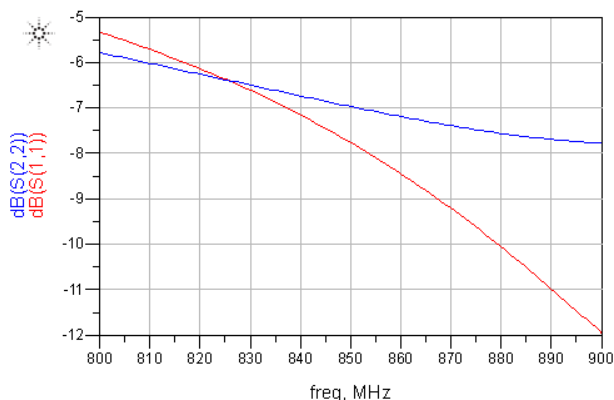


图 4.56 S11 和 S22 曲线

## 4.5 谐波平衡仿真

谐波平衡仿真是一种频域仿真方法，主要用来分析射频非线性电路，可在混频器和大信号号放大器的设计中使用。谐波平衡仿真的输入参量可以是单频或多频信号，输出参量是输入信号的谐波或交调。本节将介绍谐波平衡仿真的基本功能，主要介绍谐波平衡仿真面板、谐波平衡仿真控件、仿真的相关参数和参数的设置方法等关于谐波平衡仿真的基本内容。

### 4.5.1 仿真界面

ADS 原理图中有专门针对谐波平衡仿真的元件面板，如图 4.57 所示，元件面板中列出了谐波平衡仿真的所有仿真控件。

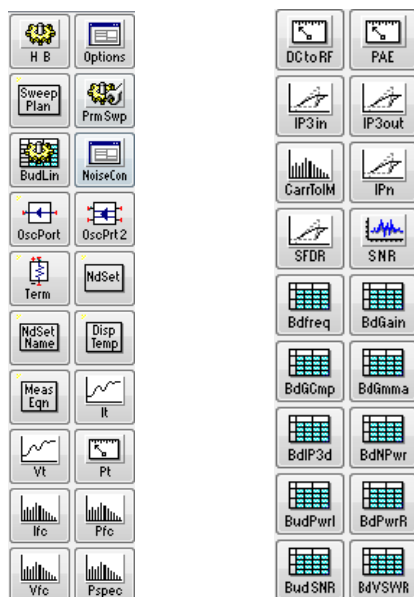


图 4.57 谐波平衡仿真面板

在图 4.57 所示的谐波平衡仿真面板上，有多个谐波平衡仿真控件，下面将对这些谐波平衡仿真控件分别加以说明。

### 1. 谐波平衡仿真控制器 (HB)

谐波平衡仿真控制器是控制谐波平衡仿真的最主要控件,使用谐波平衡仿真控制器可以设置谐波平衡仿真的基准频率、最高次谐波、扫描参数、初值推测、振荡分析、噪声控制、小信号分析和参数显示等相关参数。

### 2. 谐波平衡仿真设置控制器 (Options)

谐波平衡仿真设置控制器主要用来设置谐波平衡仿真的外部环境和计算方式,如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件的特性等相关内容。

### 3. 参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)

参数扫描计划控制器主要用来控制仿真中的参数扫描计划,用户可以通过这个控制器添加一个或多个扫描变量,并制订相应的扫描计划。

### 4. 参数扫描控制器 (Parameter Sweep)

参数扫描控制器用来控制仿真中的扫描参数,这个扫描参数可以对多个仿真的仿真实例进行扫描。

### 5. 线性预算仿真控件 (BudLin)

预算控件实质上是测量方程,用来预算仿真中的各种参数,谐波平衡仿真面板中的线性预算仿真控件用来对电路的线性化预算进行分析。

### 6. 噪声控制控件 (NoiseCon)

噪声控制控件用来设置谐波平衡仿真过程中的噪声频率、噪声节点、噪声来源与噪声相位等与噪声相关的参数。

### 7. 接地振荡器端口元件 (OscPort)

接地振荡器端口元件是用来分析一个单端口的振荡器,在谐波平衡仿真时可以构成电路的元件,用来分析一个单端口的特性。

### 8. 差分振荡器端口元件 (OscPrt2)

差分振荡器端口元件同样是振荡器元件,不同的是差分振荡器端口元件用在差分结构的振荡器中。

### 9. 终端负载元件 (Term)

谐波平衡仿真面板中的终端负载元件用来定义电路端口的标号以及各电路端口的终端负载阻抗。

### 10. 节点设置 (NdSet) 与节点名 (NdSet Name) 控件

节点设置与节点名控件用来设置谐波平衡仿真的相关节点以及节点名称。

### 11. 显示模板控件 (Display Template)

显示模板控件用来设置显示模板,显示模板用来设置仿真结果的显示方式。

## 12. 仿真测量等式控件 (MeasEqn)

仿真测量等式控件用来添加一个或多个仿真测量等式, 在仿真结束后, 这个等式的结果将包含在仿真结果的数据组中。

## 13. 时域电流波形控件 (It) 与时域电压波形控件 (Vt)

通过时域电流波形控件与时域电压波形控件, 可以显示谐波平衡仿真中时域电流的波形与时域电压的波形。

## 14. 功率显示控件 (Pt)

功率显示控件用来显示仿真电路中各端口的功率。

## 15. 频域电流 (Ifc)、频域电压 (Vfc) 和功率谱密度显示控件 (Pspec)

通过频域电流和频域电压显示控件, 可以显示谐波平衡仿真中频域电流、频域电压的频率成分。通过功率谱密度显示控件, 可以显示谐波平衡仿真中信号的功率谱密度。

## 16. 直流功率转换为射频功率的效率控件 (DCtoRF)

该控件可以表示出直流功率转换为射频功率的效率。

## 17. 输入三阶交调点分析控件 (IP3in) 和输出三阶交调点分析控件 (IP3out)

三阶交调是谐波平衡仿真中的重要参数, 该控件可以用来分析谐波平衡仿真中输入三阶交调点输出三阶交调点。

## 18. N 阶截止点分析控件 (IPn)

在谐波平衡仿真中, N 阶截止点分析控件用来分析电路的 N 阶截止点, 其中 N 的数值可以在参数设置中进行设置。

## 19. 无寄生动态范围控件 (SFDR)

在谐波平衡仿真中, 无寄生动态范围控件用来分析电路的无失真动态范围。

## 20. 信噪比分析控件 (SNR)

在谐波平衡仿真中, 信噪比分析控件用来分析电路中的信噪比。

## 21. 预算控件

谐波平衡仿真中的预算控件实质上都是测量方程, 用来预算谐波平衡仿真中的各种参数。谐波平衡仿真中的预算控件包括频率预算控件、功率增益预算控件、功率增益压缩预算控件、反射系数预算控件、三阶交调预算控件、噪声功率预算控件、入射功率预算控件、反射功率预算控件、信噪比预算控件和驻波比预算控件。这里需要说明的是, 上述预算控件必须在谐波平衡仿真控制器中选中【Perform Budget Simulation】项时, 才能起作用。

### 4.5.2 仿真操作


在执行谐波平衡仿真前, 需要对谐波平衡仿真控件的参数进行设置, 软件是根据各个参数来执行仿真的。在谐波平衡仿真的多个控件中, 只有谐波平衡仿真控制器 (HB) 是必须要设置的, 其他控件根据需要来决定是否需要设置。下面介绍谐波平衡仿真中的相关参数并给出设置参数的方法。

## 1. 谐波平衡仿真控制器

在进行谐波平衡仿真前，需要将谐波平衡仿真控制器（HB）插入原理图中并进行设置，下面给出谐波平衡仿真控制器各个参数的设置方法和含义。

### 1) 谐波平衡仿真控制器参数设置的操作步骤

(1) 在原理图的元件面板列表上，选择谐波平衡仿真【Simulation-HB】项，元件面板上出现谐波平衡仿真的多个控件图标。

(2) 在谐波平衡仿真元件面板上，单击谐波平衡仿真控制器（HB），然后再单击原理图的画图区，将谐波平衡仿真控制器插入原理图的画图区。单击工具栏中的  按钮，结束当前命令。这时原理图如图 4.58 所示，这是谐波平衡仿真控制器的默认状态，在进行谐波平衡仿真前，需要对图 4.58 所示的谐波平衡仿真控制器进行设置。

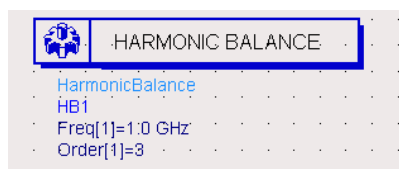
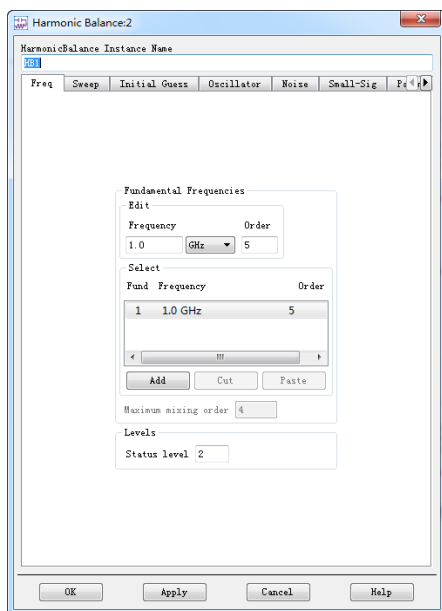


图 4.58 原理图中谐波平衡仿真控制器的默认状态

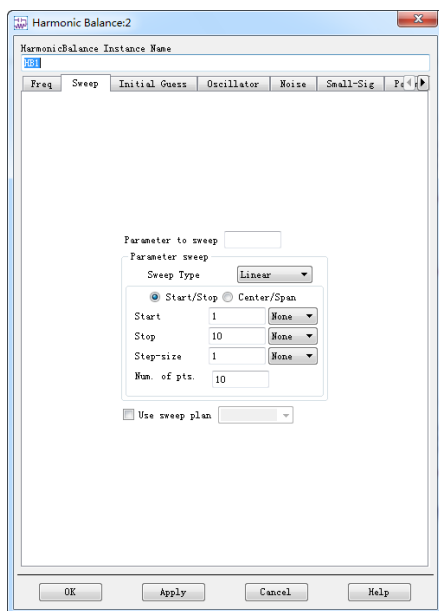
(3) 双击原理图画图区的谐波平衡仿真控制器（HARMONICBALANCE），出现【Harmonic Balance】对话框，对话框中有【Frequency】、【Sweep】、【Oscillator】、【Noise】、【Small-Sig】、【Parameters】、【Output】和【Display】等项，在对话框中可以对这些项进行参数设置。

(4) 【Harmonic Balance】对话框中的【Frequency】（频率参量）和【Sweep】（扫描参量）项，如图 4.59 所示，其中【Frequency】项用来设置仿真中的基准频率和高次谐波，【Sweep】项用来设置扫描参量。

(5) 【Harmonic Balance】对话框中的【Oscillator】（振荡器参量）和【Noise】（噪声参量）项，所示，其中【Oscillator】项用来分析仿真中的振荡器，Noise 项用来分析仿真中的噪声，如图 4.60 所示。

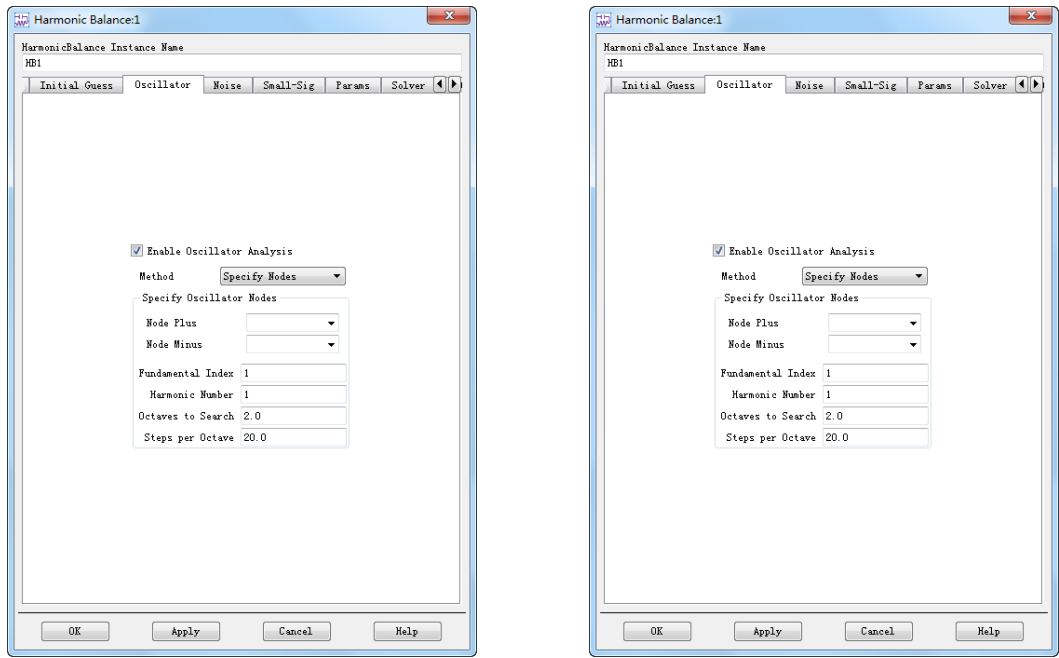


(a) 频率参量设置界面



(b) 扫描参量设置界面

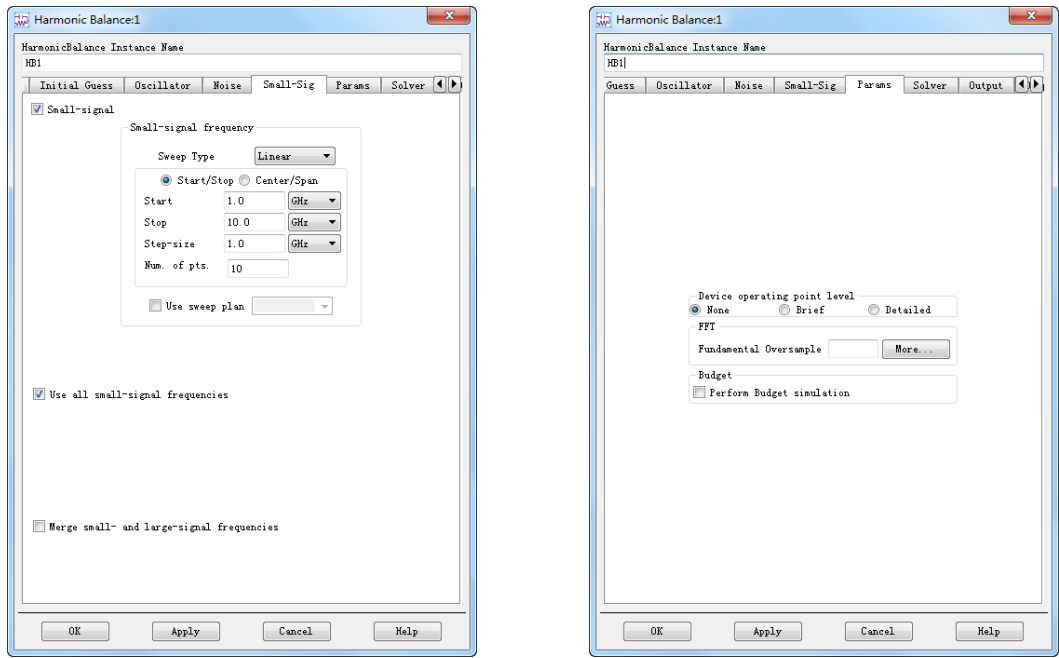
图 4.59 谐波平衡仿真中频率参量和扫描参量的设置界面



(a) 振荡器参量设置界面 (b) 噪声参量设置界面

图 4.60 谐波平衡仿真中振荡器参量和噪声参量的设置界面

(6) 【Harmonic Balance】对话框中的【Small-Sig】(小信号参量)和【Params】(仿真参量)项,如图 4.61 所示,其中【Small-Sig】项用来对仿真中的小信号进行分析,【Params】项用来设置仿真中的参数。



(a) 小信号参量设置界面 (b) 仿真参量设置界面

图 4.61 谐波平衡仿真中小信号参量和仿真参量的设置界面



### 2) 谐波平衡仿真控制器中参数的含义和设置方法

谐波平衡仿真控制器中需要对频率参量、扫描参量、仿真参量和噪声参量等进行设置，下面分别列表对频率参量和扫描参量加以描述。

#### (1) 频率参量。

谐波平衡仿真中的频率参量与交流仿真和 S 参数仿真中的频率参量有所不同，谐波平衡仿真中的频率参量用来设置仿真中的基准频率和高次谐波，而不是用来设置频率扫描。频率参量在谐波平衡仿真控制器设置窗口中的【Frequency】项中设置，频率参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.11 所示。

表 4.11 频率参量

参数名称	参数描述	备注
Frequency	基波频率	谐波平衡仿真中可以选择单频也可以选择多频，谐波平衡仿真中至少需要设置一个基波频率
Order	最大谐波的次数	基波频率含有的最大谐波次数
Maximum mixing order	最大混频的次数	在谐波平衡仿真中当选择多频时，需要选择这些频率混频后的最大混频次数
Status level	设置仿真状态窗口中显示信息多少	0 代表显示很少的仿真信息； 1 和 2 表示显示正常的仿真信息； 3 和 4 表示显示较多的仿真信息

#### (2) 扫描参量。

在谐波平衡仿真中可能需要对某个参数进行扫描，扫描参量给出了谐波平衡仿真的扫描类型和扫描范围等，扫描参量在谐波平衡仿真控制器设置窗口中的【Sweep】项中设置，扫描参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.12 所示。

表 4.12 扫描参量

参数名称	参数描述	备注
Parameter to sweep	需要扫描的变量名称	必须是原理图中包含的变量名称
Sweep Type	变量扫描类型	Single Point 为单点仿真； Linear 为线性扫描； Log 为对数扫描
Start/Stop 或 Center/Span	扫描范围设定类型	Start/Stop 表示扫描变量范围由起始值和终止值确定； Center/Span 表示扫描变量范围由中心值和取值范围确定
Start	扫描参数的起始值	仅在扫描范围设定类型选择为 Start/Stop 时有效
Stop	扫描参数的终止值	仅在扫描范围设定类型选择为 Start/Stop 时有效
Step-size	扫描参数的间隔	仅在扫描范围设定类型为 Linear 时有效
Center	扫描参数的中心值	仅在扫描范围设定类型选择为 Center/Span 时有效
Span	扫描参数的范围	仅在扫描范围设定类型选择为 Center/Span 时有效
Pts./decade	参数每增加 10 倍扫描的点数	仅在扫描范围设定类型选择为 Log 时有效
Num.of pts	扫描参数的点数	在给定 Start、Stop 和 Step-size (Pts./decade) 后，系统自动生成
Use sweep plan	是否使用扫描计划	如果选择使用扫描计划，必须添加“SWEEP PLAN”控件，并在控件中进行相应的设置

### 3) 谐波平衡仿真控制器参数的显示

当设置完成谐波平衡仿真控制器中的参数后，可以在原理图中将设置结果显示出来。显示设置结果的操作步骤如下。



### 3. 线性预算仿真控件和噪声控制控件

可以设置并显示线性预算仿真控件和噪声控制控件,图 4.65 中显示了它们可以设置的参量。

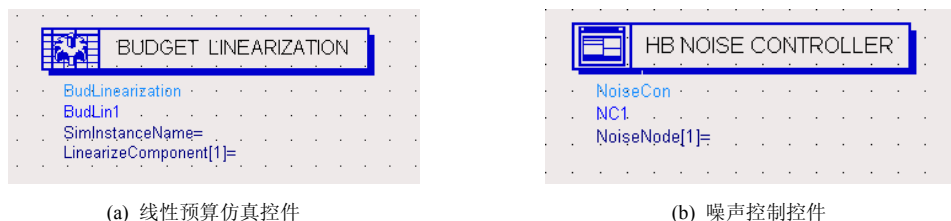


图 4.65 线性预算仿真控件和噪声控制控件

### 4. 接地振荡器端口元件和差分振荡器端口元件

可以设置并显示接地振荡器端口元件和差分振荡器端口元件,图 4.66 中显示了它们可以设置的参量。

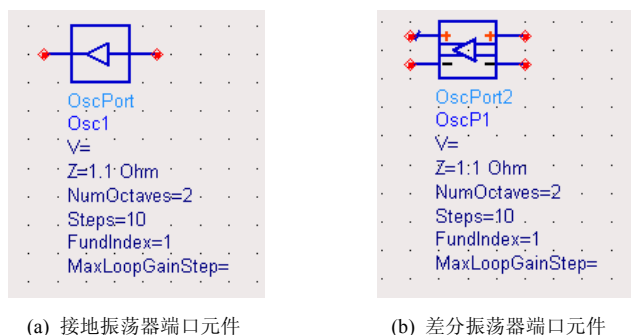


图 4.66 接地振荡器端口元件和差分振荡器端口元件

### 5. 时域电流、电压波形控件和功率显示控件

可以设置并显示时域电流、时域电压波形控件和功率显示控件,图 4.67 中显示了它们可以设置的参量。

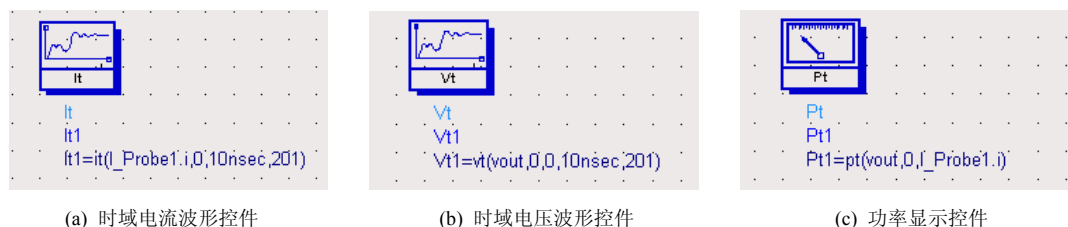


图 4.67 时域电流、电压波形控件和功率显示控件

### 6. 频域电流、频域电压和功率谱密度显示控件

可以设置并显示频域电流、频域电压和功率谱密度显示控件,图 4.68 中显示了它们可以设置的参量。

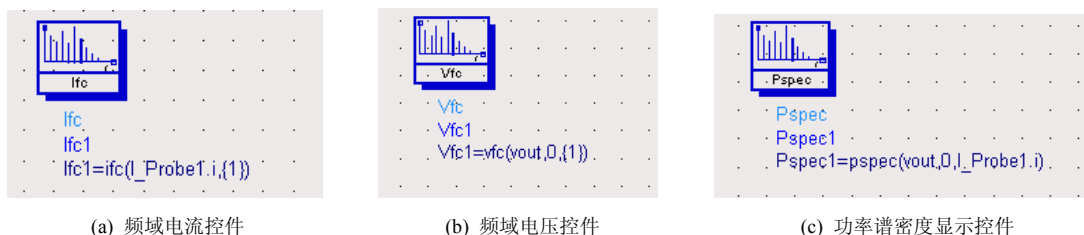


图 4.68 频域电流、频域电压和功率谱密度显示控件

## 7. 输入、输出三阶交调点分析控件和 N 阶截止点分析控件

可以设置并显示输入、输出三阶交调点分析控件和 N 阶截止点分析控件，图 4.69 中显示了它们可以设置的参量。



图 4.69 输入、输出三阶交调点分析控件和 N 阶截止点分析控件

## 8. 无寄生动态范围控件和信噪比分析控件

可以设置并显示无寄生动态范围控件和信噪比分析控件，图 4.70 中显示了它们可以设置的参量。

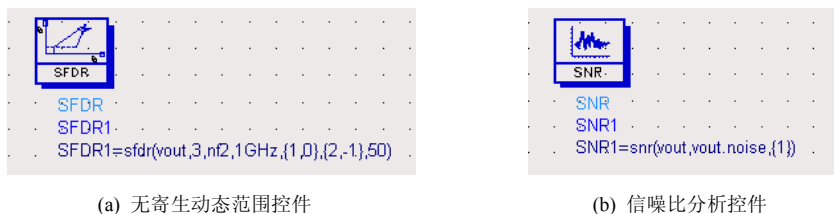


图 4.70 无寄生动态范围控件和信噪比分析控件

## 9. 预算控件

可以设置并显示预算控件，预算控件有频率预算控件、功率增益预算控件、功率增益压缩预算控件、反射系数预算控件、三阶交调预算控件、噪声功率预算控件、入射功率预

算控件、反射功率预算控件、信噪比预算控件和驻波比预算控件。原理图中的部分预算控件如图 4.71 所示,图 4.71(a)为频率预算控件,图 4.71(b)为功率增益预算控件,图 4.71(c)为功率增益压缩预算控件。



图 4.71 原理图中的谐波平衡预算控件

## 10. 其他谐波平衡仿真控件

其他谐波平衡仿真控件包括谐波平衡仿真设置控制器 (Options)、参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)、参数扫描控制器 (Parameter Sweep)、节点设置 (Ndset) 控件、节点名 (Ndset Name) 控件、显示模板控件 (Display Template) 和仿真测量等式控件 (MeasEqn), 这些谐波平衡仿真中的控件与直流仿真中的相应控件意义和功能基本相同, 这里不再赘述。

## 4.5.3 仿真例程


ADS 软件有两个自带的谐波平衡仿真例程, 一个是射频输入恒定的谐波平衡仿真例程, 一个是带变量扫描的谐波平衡仿真例程, 这两个例程可以帮助读者了解谐波平衡仿真的基本内容和基本方法。本节将给出这两个谐波平衡仿真例程的电路原理图, 并将谐波平衡电路原理图的仿真结果显示出来。

### 1. 射频输入恒定的谐波平衡仿真例程

#### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗打开谐波平衡仿真例程原理图, 打开原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件, 弹出主视窗。

(2) 单击主视窗工具栏中的  按钮, 在文件管理区可以看到 examples 文件夹及其内容, 文件夹内是所有的例程。双击 examples 文件夹中的 Tutorial 文件夹, 进入 Tutorial 文件夹。

(3) 双击 Tutorial 文件夹中的 SimModels\_wrk.7zads, 将其解压到当前工作目录。

(4) 单击项目浏览区的 HB1, 出现 HB1 的 schematic 文件, 双击该文件, 就可以打开射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图了。射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图如图 4.72 所示。

#### 2) 原理图说明

射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图由 BJT 晶体管、直流电压源、频域电压源、电阻、电容、谐波平衡仿真控制器和变量控件构成, 下面对上述构成元件加以说明。

(1) BJT 晶体管。在图 4.72 所示的原理图电路中, BJT\_NPN 晶体管没有子电路, 这个晶体管的参数主要是由电路旁边的晶体管模型 BJT\_Model 设定的, 双击【BJT\_Model】项, 可以打开【Bipolar Transistor Model】对话框, 由【Bipolar Transistor Model】对话框可以查看该晶体管的参数。

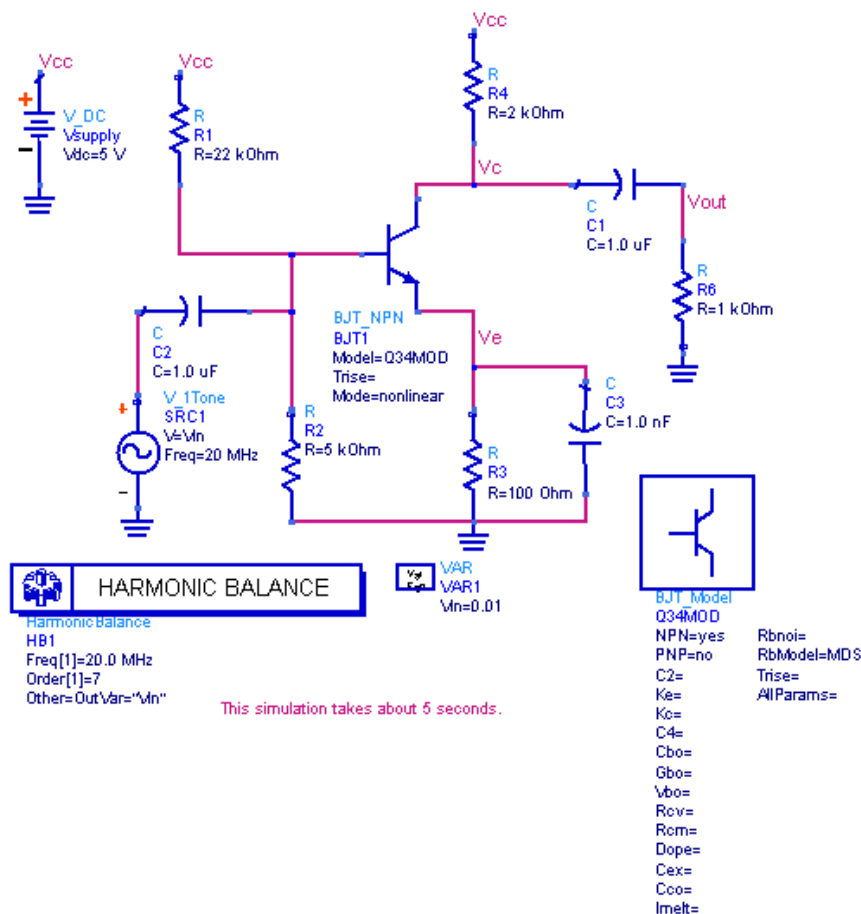


图 4.72 射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图

(2) 直流电压源和频域电压源。在图 4.72 所示的原理图中，有直流电压源 V\_DC 和频域电压源 V\_1Tone，这两个源的参数已经在原理图中显示出来，其中直流电压源 V\_DC 的电压为 5V，频域电压源 V\_1Tone 的电压为单频、振幅为 Vin，Vin 的值在变量控件 VAR 中设置。

(3) 电阻和电容。在图 4.72 所示的原理图中有电阻和电容，电阻用来确定直流工作点和射频信号输出，电容用来隔直流通交流。

(4) 仿真控制器。在如图 4.72 所示的原理图中，有谐波平衡仿真控制器 HARMONIC BALANCE，谐波平衡仿真控制器用来设置谐波平衡仿真的参数，这里谐波平衡仿真控制器的设置如下。

① Freq[1]=20.0MHz，表示谐波平衡仿真的基准频率为 20.0MHz。由于频域电压源 V\_1Tone 的电压为单频，因此谐波平衡仿真只有一个基准频率。


② Order[1]=7，表示谐波平衡仿真时基波频率的最大谐波次数为 7。

③ 谐波平衡仿真时有变量 Vin。

(5) 变量控件。在如图 4.72 所示的原理图中，有变量控件 VAR，原理图中的变量都在变量控件 VAR 中显示，同时变量控件 VAR 设置所有变量的默认值。在 HB1.dSn 原理图的电路中，只有一个变量 Vin，Vin 为频域电压源的振幅，这里 Vin 设置为固定值，Vin 设置为 0.01。

### 3) 原理图仿真及其仿真结果显示

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果, 查看仿真结果的步骤如下。

① 在 HB1.dsn 原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。

② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 仿真结果显示的方式是设定好的, 数据显示视窗会自动显示仿真结果, 如图 4.73 所示。

Fundamental and Harmonic Output Voltages Relative to Input Voltage

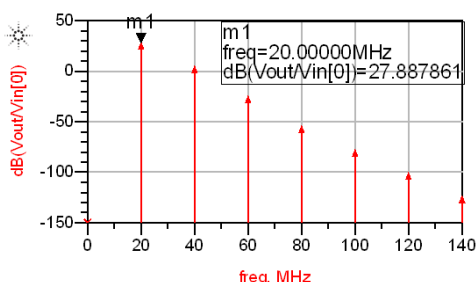


图 4.73 射频输入恒定时谐波平衡仿真的结果显示

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中, 可以直接查看, 查看的步骤如下。

① 在射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图视窗中, 选择【Window】→【Open Data Display】选项, 弹出【Open Data Display】对话框。

② 在【Open Data Display】对话框中, 单击【HB1.dds】项, 选择查看射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图的仿真结果, 然后单击对话框中的【打开】按钮, 关闭对话框。

③ 当【Open Data Display】对话框关闭后, 如图 4.73 所示的仿真结果会自动弹出。

## 2. 带变量扫描的谐波平衡仿真例程

### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗, 打开带变量扫描谐波平衡仿真例程原理图的步骤, 与打开射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图的步骤相同, 打开带变量扫描谐波平衡仿真例程原理图的步骤如下。

(1) 选择主视窗中的【View】→【Example Directory】命令, 在主视窗的文件管理区可以看到 examples 文件夹。

(2) 单击项目浏览区的 HB2, 出现 HB2 的 schematic 文件, 双击该文件, 就可以打开带变量扫描的谐波平衡仿真原理图了。带变量扫描的谐波平衡仿真原理图如图 4.74 所示。

### 2) 原理图说明

带变量扫描的谐波平衡仿真原理图同样由 BJT 晶体管、直流电压源、频域源、电阻、电容、谐波平衡仿真控制器和变量控件构成, 但这些构成元件的参数与射频输入恒定的谐波平衡仿真原理图有所不同, 下面对上述构成元件加以说明。

#### (1) BJT 晶体管。

在图 4.74 所示的原理图电路中, 有两个 BJT\_NPN 晶体管, 这两个 BJT\_NPN 晶体管的参数相同, 因此原理图中只有一个晶体管模型 BJT\_Model, 这两个 BJT\_NPN 晶体管的参数都是由电路旁边的晶体管模型 BJT\_Model 设定的。

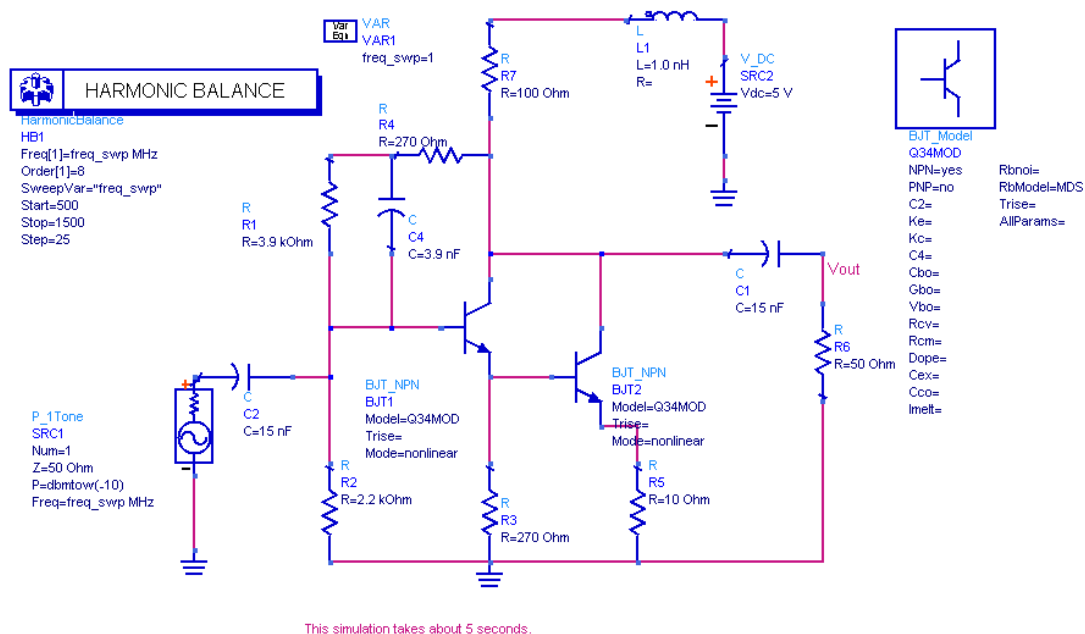


图 4.74 带变量扫描的谐波平衡仿真原理图

## (2) 直流电压源和频域功率源。

在如图 4.74 所示的原理图中，有直流电压源  $V\_DC$  和频域功率  $P\_1Tone$ ，这两个源的参数已经在原理图中显示出来，其中直流电压源  $V\_DC$  的电压为 5V，频域功率源  $P\_1Tone$  为单频源。这里频域功率源的设置如下。

- ①  $P\_1Tone$ ，表示频域功率源为单频源，谐波平衡仿真只有一个基准频率。
- ②  $Z=50\text{ Ohm}$ ，表示频域功率源的内阻  $50\Omega$ 。
- ③  $P=dbmtow(-10)$ ，表示频域功率源的输出功率为  $-10\text{ dBm}$ 。
- ④  $Freq=freq\_Swp\text{MHz}$ ，表示频域功率源的频率为变量。

## (3) 电感、电阻和电容。

在如图 4.74 所示的原理图中，有电感、电阻和电容，电感、电阻和电容作用如下。

- ① 电感为射频扼流圈，在频率较高时射频扼流圈用来通直流、隔交流。
- ② 电阻用来确定直流工作点和射频信号输出。
- ③ 电容用来隔直流、通交流。

## (4) 仿真控制器。

在如图 4.74 所示的原理图中，有谐波平衡仿真控制器 HARMONIC BALANCE，谐波平衡仿真控制器用来设置谐波平衡仿真的参数，这里谐波平衡仿真控制器的设置如下。


- ①  $Freq[1]=freq\_Swp\text{MHz}$ ，表示谐波平衡仿真的基准频率为变量  $freq\_Swp\text{MHz}$ 。由于频域功率源  $P\_1Tone$  为单频，因此谐波平衡仿真只有一个基准频率。
- ②  $Order[1]=8$ ，表示谐波平衡仿真时基波频率的最大谐波次数为 8。
- ③  $SweepVar="freq\_Swp"$ ，表示谐波平衡仿真时对频率变量扫描。
- ④  $Start=500$ ，表示谐波平衡仿真时对频率扫描的起始值为  $500\text{MHz}$ 。
- ⑤  $Stop=1500$ ，表示谐波平衡仿真时对频率扫描的终止值为  $1500\text{MHz}$ 。
- ⑥  $Step=25$ ，表示谐波平衡仿真时对频率扫描的间隔为  $25\text{MHz}$ ，扫描的类型为线性。



(5) 变量控件。在如图 4.74 所示的原理图中, 有变量控件 VAR, 原理图中的变量都在变量控件 VAR 中显示, 同时变量控件 VAR 设置所有变量的默认值。在带变量扫描的谐波平衡仿真原理图的电路中, 只有一个变量 freq\_Swp, freq\_Swp 为频域功率源的频率, 这里 freq\_Swp 的初值设置为 1MHz。

### 3) 原理图仿真及其仿真结果显示

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果, 查看仿真结果的步骤如下。

- ① 在带变量扫描的谐波平衡仿真原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。
- ② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 仿真结果显示的方式是设定好的, 数据显示视窗会自动显示仿真结果, 如图 4.75、图 4.76 和图 4.77 所示。

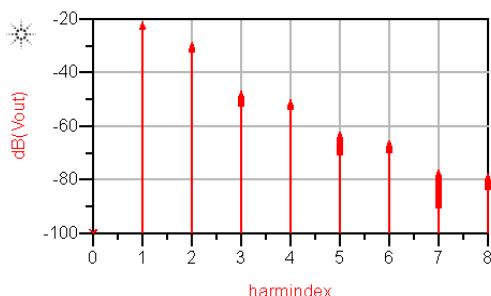


图 4.75 带变量扫描谐波平衡仿真的输出功率谱

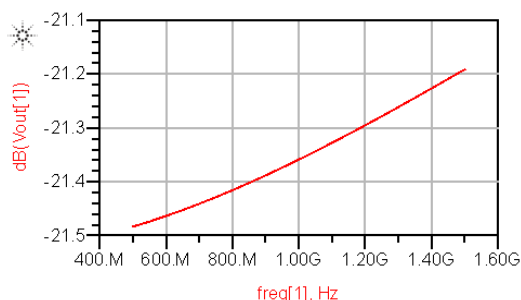


图 4.76 带变量扫描谐波平衡仿真的输出功率曲线

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中, 可以直接查看, 查看的步骤如下。

① 在带变量扫描的谐波平衡仿真原理图视窗中, 选择【Window】→【Open Data Display】命令, 弹出【Open Data Display】对话框。

② 在【Open Data Display】对话框中, 单击【HB2.dds】项, 选择查看带变量扫描的谐波平衡仿真原理图的仿真结果, 然后单击对话框中的【打开】按钮, 关闭对话框。

③ 当【Open Data Display】对话框关闭后, 图 4.75、图 4.76 和图 4.77 所示的仿真结果会自动弹出。

harminindex	HE2_freq
freq_swp=500.000	
0	0.0000 Hz
1	500.0 MHz
2	1.000 GHz
3	1.500 GHz
4	2.000 GHz
5	2.500 GHz
6	3.000 GHz
7	3.500 GHz
8	4.000 GHz
freq_swp=525.000	
0	0.0000 Hz
1	525.0 MHz
2	1.050 GHz
3	1.575 GHz
4	2.100 GHz
5	2.625 GHz
6	3.150 GHz
7	3.675 GHz
8	4.200 GHz
freq_swp=550.000	
0	0.0000 Hz
1	550.0 MHz
2	1.100 GHz
3	1.650 GHz
4	2.200 GHz
5	2.750 GHz
6	3.300 GHz

图 4.77 带变量扫描谐波平衡仿真的谐波成分列表

## 4.6 电路包络仿真

电路包络仿真非常适合对射频调制信号进行全面和快速的分析，它的特点是同时在时域和频域处理信号，在时域上，对相对低频的调制信息进行直接采样处理，而对相对高频的载波部分，则在频域进行处理，这样的结合使仿真的速度和效率都得到了提升，能很好地仿真具有高频的载波和变化较慢的调制信息，是目前在射频微波系统上进行混合仿真的有效工具之一，其仿真花费的时间较 SPICE 大为减少。目前电路包络仿真多用在含调制和解调的电路仿真中，非常适合应用日趋广泛的 DMA 和 GSM 系统，并可对 QPSK 和 QAM 等的调制方式进行有效的处理。本节将介绍电路包络仿真的基本功能，主要介绍电路包络仿真面板、电路包络仿真控件、仿真的相关参数和参数的设置方法等关于电路包络仿真的基本内容。

### 4.6.1 仿真界面

ADS 原理图中有专门针对电路包络仿真的元件面板，如图 4.78 所示，元件面板中列出了电路包络仿真的所有仿真控件。

在图 4.78 所示的电路包络仿真面板上，有多个电路包络仿真控件，下面将对这多个电路包络仿真控件分别加以说明。

#### 1. 电路包络仿真控制器（ENV）

电路包络仿真控制器是控制电路包络仿真的最主要控件，使用电路包络仿真控制器可以设置仿真执行的时间、仿真的基波频率、仿真的谐波次数和仿真的混频次数等相关参数。

#### 2. 电路包络仿真设置控制器（Options）

电路包络仿真设置控制器主要用来设置电路包络仿真的外部环境和计算方式，如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件的特性等相关内容。

#### 3. 参数扫描计划控制器（Sweep Plan）

参数扫描计划控制器主要用来控制仿真中的参数扫描计划，用户可以通过这个控制器添加一个或多个扫描变量，并制订相应的扫描计划。

#### 4. 参数扫描控制器（Parameter Sweep）

参数扫描控制器用来控制仿真中的扫描参数，这个扫描参数可以对多个仿真的仿真实例进行扫描。

#### 5. 节点设置（Ndset）与节点名（Ndset Name）控件

节点设置与节点名控件用来设置电路包络仿真的相关节点以及节点名称，并可以设置插入节点处的参考电压等。

#### 6. 显示模板控件（Display Template）

显示模板控件用来设置显示模板，显示模板用来设置仿真结果的显示方式。



图 4.78 电路包络仿真面板

## 7. 仿真测量等式控件 (MeasEqn)

仿真测量等式控件用来添加一个或多个仿真测量等式,在仿真结束后,这个等式的结果将包含在仿真结果的数据组中。

### 4.6.2 仿真操作

在执行电路包络仿真前,需要对电路包络仿真控件的参数进行设置,软件是根据各个参数来执行仿真的。在电路包络仿真的多个控件中,只有电路包络仿真控制器(ENV)是必须要设置的,其他控件根据需要来决定是否需要设置。电路包络仿真是一种时域和频域综合的仿真方法,需要设置时域和频域的参数,下面介绍电路包络仿真中的相关参数,并给出设置参数的方法。

#### 1. 电路包络仿真控制器

在进行电路包络仿真前,需要将电路包络仿真控制器(ENV)插入原理图中并进行设置,下面给出电路包络仿真控制器各个参数的设置方法和含义。

##### 1) 电路包络仿真控制器参数设置的操作步骤

(1) 在原理图的元件面板列表上,选择电路包络仿真【Simulation-Envelope】项,元件面板上出现电路包络仿真的多个控件图标。



图 4.79 原理图中电路包络仿真控制器的默认状态

(2) 在电路包络仿真元件面板上,单击电路包络仿真控制器(ENV),然后再单击原理图的画图区,将电路包络仿真控制器插入原理图的画图区。单击工具栏中的 $\blacksquare$ 按钮,结束当前命令。这时原理图如图 4.79 所示,这是电路包络仿真控制器的默认状态,在进行电路包络仿真前,需要对图 4.79 所示的电路包络仿真控制器进行设置。

(3) 双击原理图画图区的电路包络仿真控制器(ENVELOPE),出现【Circuit Envelope】对话框,对话框中有【Envelope Setup】、【Envelope Params】、【Oscillator】、【Cosim】、【Parameters】、【Noi-Se】、【Small-Sig】、【Output】和【Display】等项,在对话框中可以对这些项进行参数设置。

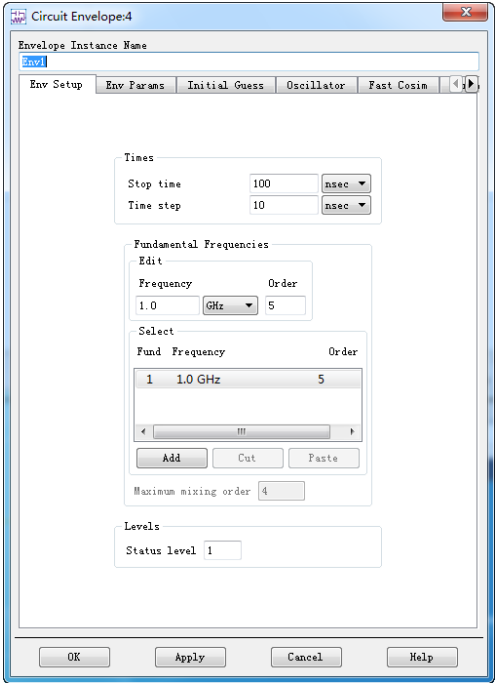
(4) 【Circuit Envelope】对话框中的【Envelope Setup】(包络设置)和【Envelope Params】(包络参数)项,如图 4.80 所示,其中【Envelope Setup】项用来设置仿真中的起始时间、终止时间、基准频率和高次谐波等,【Envelope Params】项用来设置仿真执行的算法、扫描偏移量、系统噪声、带宽和公差等。

(5) 【Circuit Envelope】对话框中的【Fast Cosim】(协仿真参量)和【Noise】(噪声参量)项如图 4.81 所示,其中【Fast Cosim】项用来设置共同执行协仿真的参量,【Noise】项用来分析仿真中的噪声。

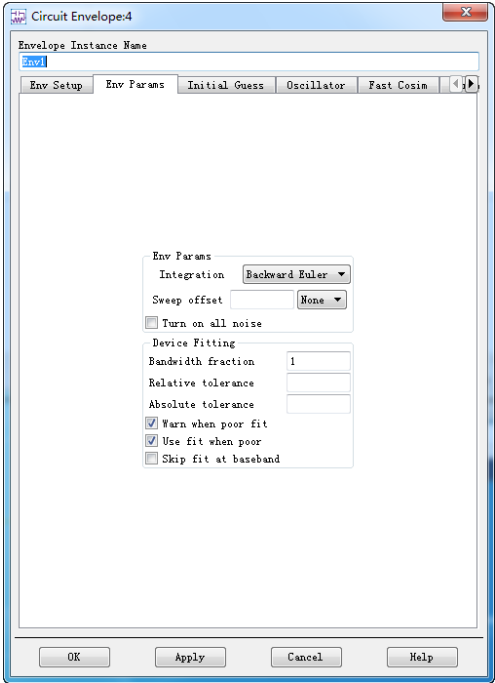
(6) 【Circuit Envelope】对话框中的【Small-Sig】(小信号参量)和【Params】(仿真参量)项,如图 4.82 所示,其中【Small-Sig】项用来对仿真中的小信号进行分析,【Params】项用来设置仿真中的参数。

##### 2) 电路包络仿真控制器中参数的含义和设置方法

电路包络仿真控制器中需要对包络设置、包络参量、协仿真参量和小信号参量等进行设置,下面分别列表对包络设置、包络参量和协仿真参量加以描述。

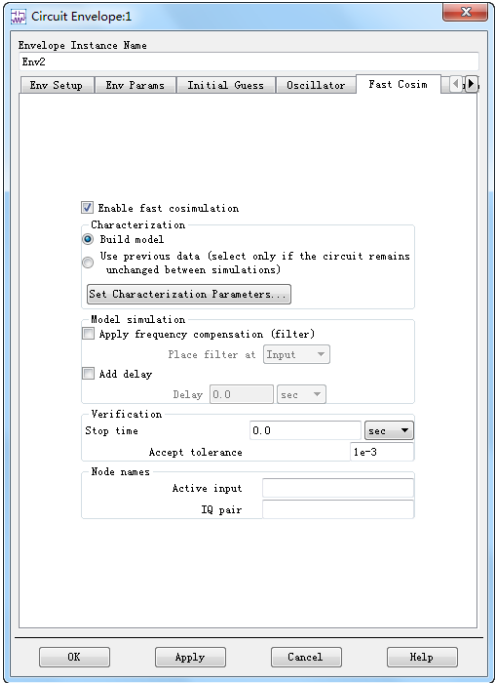


(a) 包络设置界面

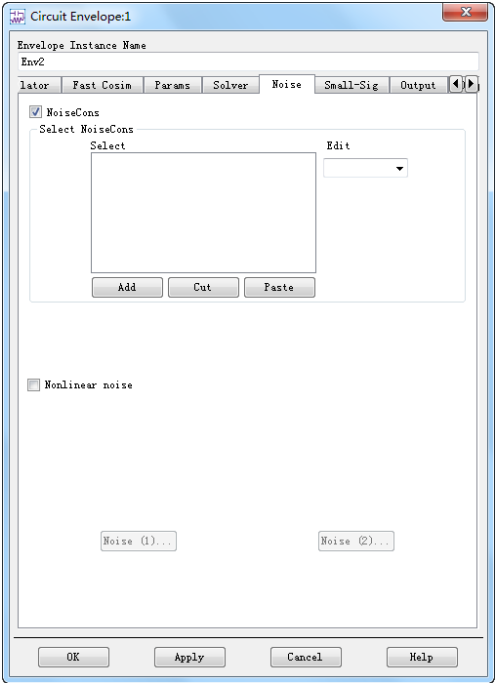


(b) 包络参数设置界面

图 4.80 电路包络仿真中包络设置和包络参数的设置界面

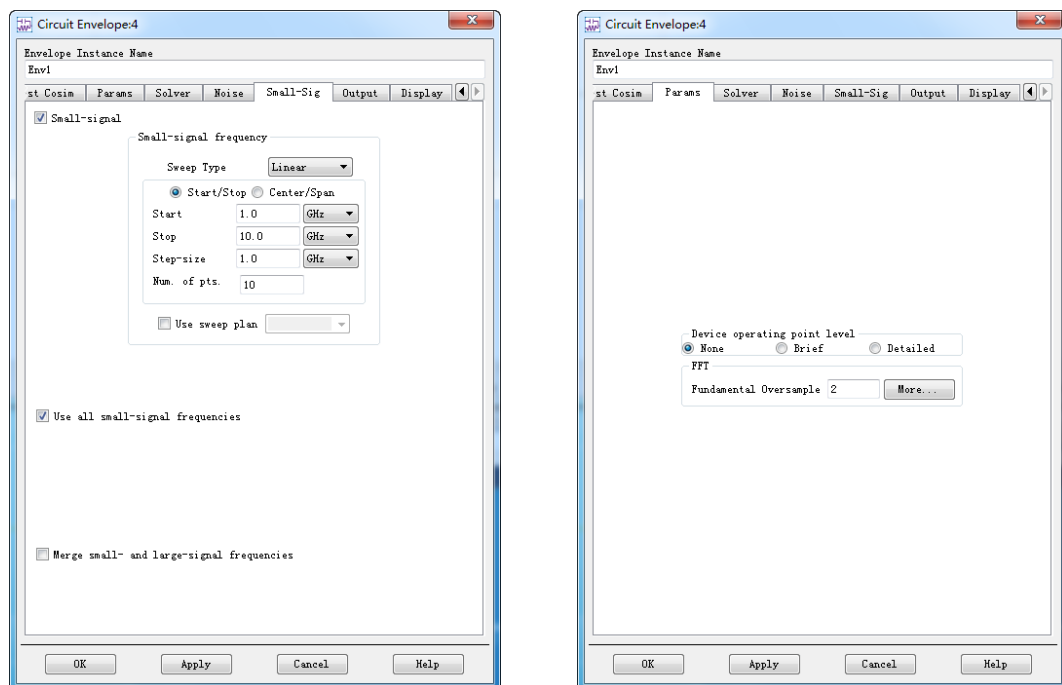


(a) 协仿真参量设置界面



(b) 噪声参量设置界面

图 4.81 电路包络仿真中协仿真参量和噪声参量的设置界面



(a) 小信号参量设置界面

(b) 仿真参量设置界面

图 4.82 电路包络仿真中小信号参量和仿真参量的设置界面

(1) 包络设置。包络设置用来设置仿真中的起始时间、终止时间、基准频率和高次谐波等。包络设置在包络仿真控制器设置窗口中的【Envelope Setup】项中设置，包络设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.13 所示。

表 4.13 包络设置

参数名称	参数描述	备注
Stop time	仿真执行的终止时间	起始时间为 0
Time step	仿真执行的时间间隔	时间间隔的设置决定了包络信号的带宽，若时间间隔为 $T$ ，系统允许的最大带宽为 $\pm 0.5/T$
Frequency	基波频率	仿真中可以选择单频也可以选择多频，电路包络仿真中至少需要设置一个基波频率
Order	最大谐波的次数	基波频率含有的最大谐波次数
Maximun mixing order	最大混频的次数	在电路包络仿真中当选择多频时，需要选择这些频率混频后的最大混频次数
Status level	设置仿真状态窗口中显示信息多少的参数	0 代表显示很少的仿真信息； 1 和 2 表示显示正常的仿真信息； 3 和 4 表示显示较多的仿真信息

(2) 包络参量设置。包络参量设置项用来设置仿真执行的算法、扫描偏移量、系统噪声、带宽和公差等。包络参量在包络仿真控制器设置窗口中的【Envelope Params】项中设置，包络参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.14 所示。

表 4.14 包络参量

参数名称	参数描述	备注
Integration	仿真中采用的算法	Backward Euler, Trapezoidal 和 Gears 表示仿真中的 3 种综合算法
Sweep offset	扫描偏移量	用来设置执行仿真时的时间偏移。例如,若 Stop time 设置为 1ms, Sweep offset 设置为 0.6ms, 则在仿真结果中将显示 0~0.4ms 的数据
Tune on all noise	包络噪声设置	若选定此项, 将打开所有的噪声
Bandwidth fraction	包络带宽	设置在仿真执行时的信号带宽
Relative tolerance	相对公差	设置仿真执行的相对公差
Absolute tolerance	绝对公差	设置仿真执行的绝对公差

(3) 协仿真参量设置。协仿真参量设置项用来设置协仿真时的输入功率、幅度值点数、相位值点数和频率值点数等。协仿真参量在包络仿真控制器设置窗口中的【Cosim】项中设置, 协仿真参量设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.15 所示。

表 4.15 协仿真参量

参数名称	参数描述	备注
Enable AVM	允许执行快速协仿真	选中此项将在仿真中对某个电路进行协仿真
Max Input Power	最大输入功率	执行协仿真时子电路的最大输入功率
Num.of amp.pts.	幅度值点数	用来设置从 0 到最大功率之间的幅度点数
Num.of phase.pts.	相位值点数	用来设置每个幅度点的相位参数
Num.of freq.pts.	频率值点数	用来设置协仿真中小信号的频率点数
Freq.compensation	频率补偿	协仿真中是否进行频率补偿
Delay	延时	协仿真中子电路的传输时延
Active input	有效输入	当子电路有多个时, 仅有一个可以设置为有效输入, 或将两个输入设置为 IQ 输入对
IQ Pair	设置 IQ 对	子电路输入与输出为 IQ 对

3) 电路包络仿真控制器参数的显示

当设置完成电路包络仿真控制器中的参数后, 可以在原理图中将设置结果显示出来。显示设置结果的操作步骤如下。

(1) 双击原理图画图区中的电路包络仿真控制器 (ENVELOPE), 出现【Circuit Envelope】对话框。

(2) 对话框中的【Display】项, 用来显示设置完成的参数。如果希望显示某参量, 需要选中某参数, 如图 4.83 所示。

(3) 单击【Circuit Envelope】对话框中的【OK】按钮, 关闭对话框, 完成原理图中电路包络仿真控制器的设置。如果将【Circuit Envelope】对话框中【Display】项的所有参数都选中, 原理图中会显示出电路包络仿真控制器的所有参数, 如图 4.84 所示。

图 4.79 与图 4.84 都是插入原理图中的电路包络仿真控制器, 图 4.79 是未设置的状态, 图 4.84 是设置后的状态。实际上, 大多数电路包络仿真控制器只有少数参量需要设置, 大部分参量都保持默认状态。

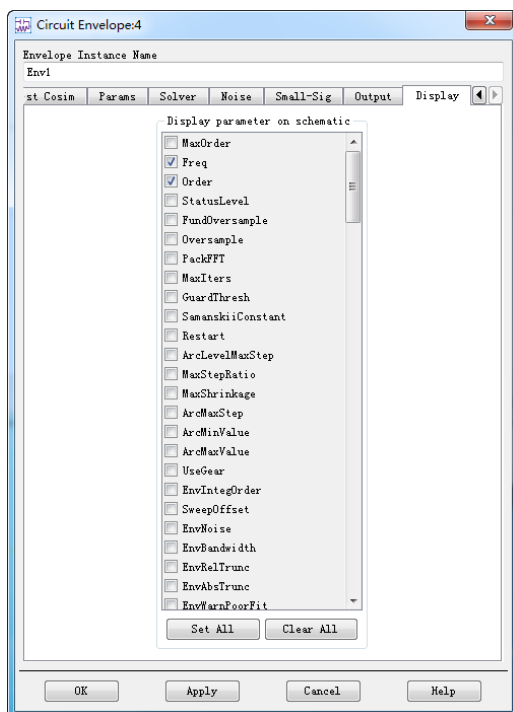


图 4.83 电路包络仿真控制器中的显示项界面

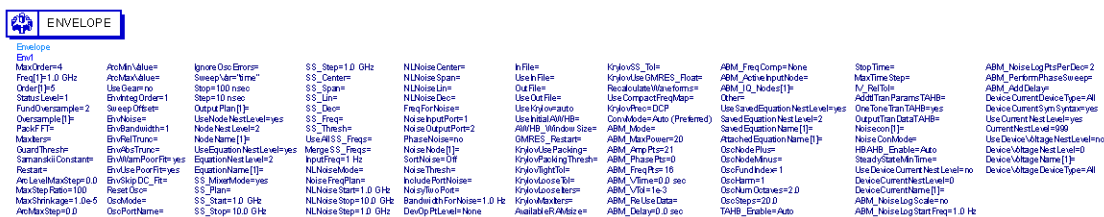


图 4.84 原理图中显示所有参量的电路包络仿真控制器

## 2. 其他电路包络仿真控件

其他电路包络仿真控件包括电路包络仿真设置控制器（Options）、参数扫描计划控制器（Sweep Plan）、参数扫描控制器（Parameter Sweep）、节点设置（Ndset）控件、节点名（Ndset Name）控件、显示模板控件（Display Template）和仿真测量等式控件（MeasEqn），这些电路包络仿真中的控件与直流仿真中的相应控件意义和功能基本相同，这里不再赘述。

### 4.6.3 仿真例程

ADS 软件有一个自带的电路包络仿真例程，这个电路包络仿真例程用于分析一个混频器。本节将给出电路包络仿真例程的原理图，并在数据显示视窗将原理图的仿真结果显示出来。

#### 1. 电路包络仿真例程原理图

##### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗打开电路包络仿真例程原理图，打开原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件, 弹出主视窗, 在 ADS 主视窗, 单击工具栏的  按钮, 在文件管理区可以看到 examples 文件夹及其内容, 文件夹内是所有的例程。

(2) 双击 examples 文件夹中的 RFIC 文件夹, 进入 RFIC 文件夹。

(3) 双击 RFIC 文件夹中的 Mixers\_wrk.7zads, 将其解压到当前工作目录。

(4) 单击项目浏览区的 IMDRFSwpEnv, 出现 IMDRFSwpEnv 的 schematic 文件, 双击该文件, 就可以打开电路包络仿真原理图了。电路包络仿真原理图如图 4.85 和图 4.86 所示, 其中图 4.85 为电路包络仿真原理图的电路部分, 图 4.86 为电路包络仿真原理图的各种仿真控件。

## 2) 原理图说明

电路包络仿真原理图由原理图的电路部分、电路包络仿真控制器、参数扫描控制器、变量控件和仿真测量等式控件构成, 下面对上述构成元件加以说明。

### (1) 原理图的电路部分。

图 4.85 中的电路包络仿真原理图的电路部分, 是一个混频器电路, 这个混频器电路由以下几个部分构成。

- ① 混频器 Gi1CellMix, Gi1CellMix 是一个电路符号, 它有子电路。
- ② 射频输入端 RF。
- ③ 本振输入端 LO。
- ④ 中频输出端 IF。
- ⑤ 直流电压源 V\_DC。

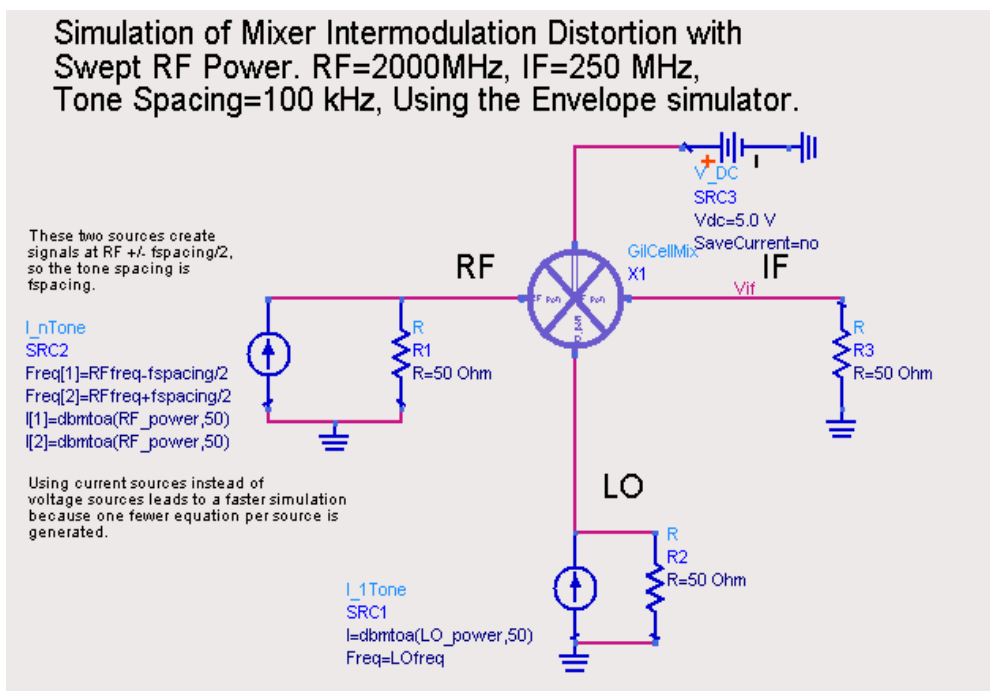


图 4.85 电路包络仿真原理图的电路部分

### (2) 电路包络仿真控制器。

在图 4.86 所示的电路包络仿真原理图的各种控件中, 有电路包络仿真控制器 ENVELOPE,



电路包络仿真控制器用来设置电路包络仿真的参数，这里电路包络仿真控制器的参数设置如下。

- ① MaxOrder=4，表示最大交调的阶数为 4。

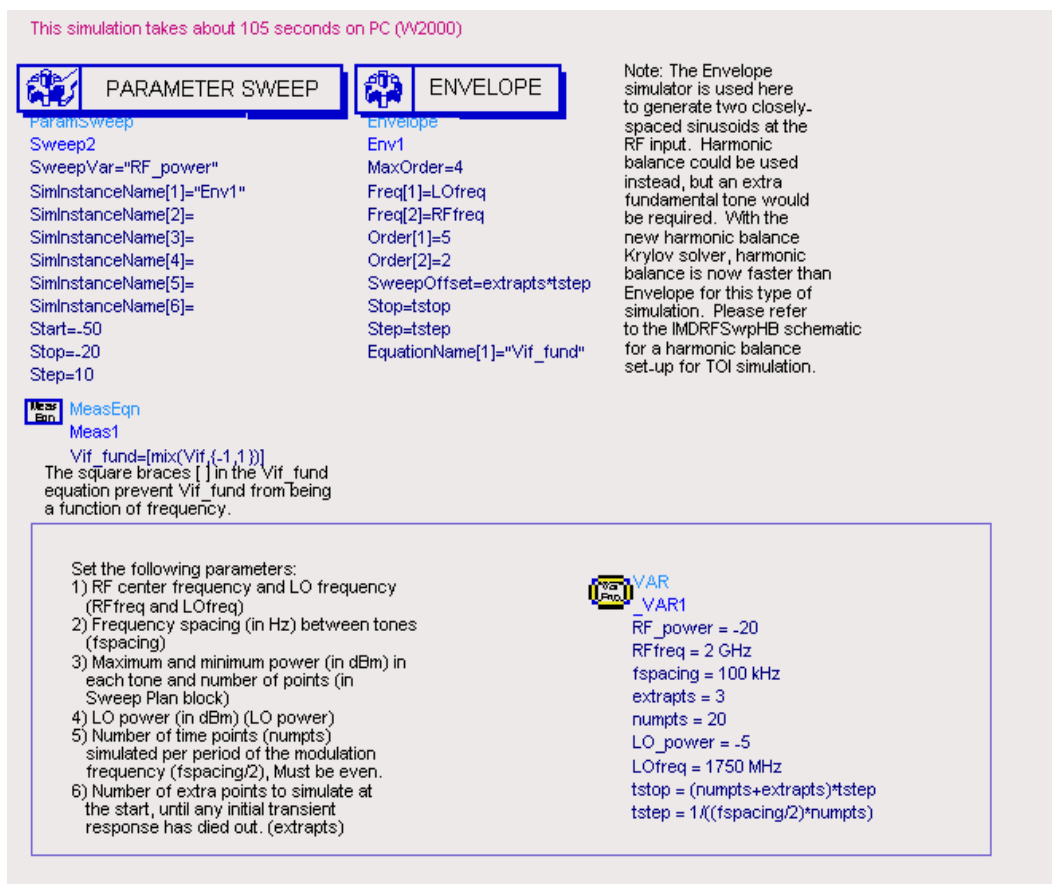


图 4.86 电路包络仿真原理图的各种仿真控件

- ② Freq[ 1 ]=LOfreq，表示一个基波频率为 LOfreq，这是本振频率。
- ③ Freq[2]=RFfreq，表示另一个基波频率为 RFfreq，这是射频频率。
- ④ Order[1]=5，表示基波频率为 LOfreq 时，谐波的阶数为 5。
- ⑤ Order[2]=2，表示基波频率为 RFfreq 时，谐波的阶数为 2。
- ⑥ SweepOffset=extrpts\*tstep，表示扫描偏移量。
- ⑦ Stop=tstop，表示扫描的终止时间为 tstop。
- ⑧ Step=tstep，表示扫描的时间间隔为 tstep。
- ⑨ EquationName[1]= “Vif\_fund”，表示公式名称为 Vif\_funds。

(3) 参数扫描控制器。

在如图 4.86 所示的电路包络仿真原理图的各种控件中，有参数扫描控制器 PARAMETER SWEEP，参数扫描控制器的参数设置如下。

- ① SweepVar= “RF\_power”，表示扫描变量为输入信号功率。

② SimInInstanceName [1]=“Env1”，表示扫描的仿真为 Env1。

③ Start=-50，表示扫描的起始值。

④ Stop=-20，表示扫描的终止值。

⑤ Step=10，表示扫描的间隔值。

(4) 变量控件。

在如图 4.86 所示的 IMDRFSwpEnv.dsn 原理图的各种控件中，有变量控件 VAR，原理图中的变量都在变量控件 VAR 中显示，同时变量控件 VAR 设置所有变量的默认值。这里变量控件的设置如下。

① RF\_power = -20，表示 RF\_ower 为变量，它的默认值为-20dBm。

② RFfreq = 2GHz，表示 RFfreq 为变量，它的默认值为 2GHz。

③ fspacing = 100KHz，表示 fspacing 为变量，它的默认值为 100kHz。

④ extrapts=3，表示 extrapts 为变量，它的默认值为 3。

⑤ numpts = 20，表示 numpts 为变量，它的默认值为 20。

⑥ LO\_ower = -5，表示 LO\_power 为变量，它的默认值为-5dBm。

⑦ LOfreq = 1750MHz，表示 LOfreq 为变量，它的默认值为 1750MHz。

⑧ tstop= (numpts+extrapts) \*tstep，表示 tstop 为变量，变量值由公式确定。

⑨ tstep=1/ ((fspacing/2) \*numpts )，表示 tstep 为变量，变量值由公式确定。


(5) 仿真测量等式控件。

仿真测量等式控件中有一个方程，这个方程为  $Vif\_fund=[mix(Vif, \{-1, 1\})]$ 。

## 2. 电路包络仿真例程的仿真结果

### 1) 原理图仿真结果的显示方法

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果，查看仿真结果的步骤如下。

① 在电路包络仿真原理图的工具栏中单击按钮，运行仿真。

② 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，仿真结果在数据显示视窗显示。

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中，可以直接查看，查看的步骤如下。

① 在电路包络仿真原理图视窗中，选择【Window】→【Open Data Display】命令，弹出【Open Data Display】对话框。

② 在【Open Data Display】对话框中，单击【IMDRFSwpEnv.dds】项，选择查看电路包络仿真原理图的仿真结果，然后单击对话框中的【打开】按钮，关闭对话框。

③ 当【Open Data Display】对话框关闭后，仿真结果会自动弹出。

### 2) 原理图仿真结果的显示

IMDRFSwpEnv 的仿真结果在数据显示视窗显示，显示的方式已经设定好，仿真结果如图 4.87 所示。

在图 4.87 中，显示了如下内容。

① 在数据显示视窗显示了中频 IF 的频谱。

② 在数据显示视窗显示了 TOI 值的方程和数据列表。

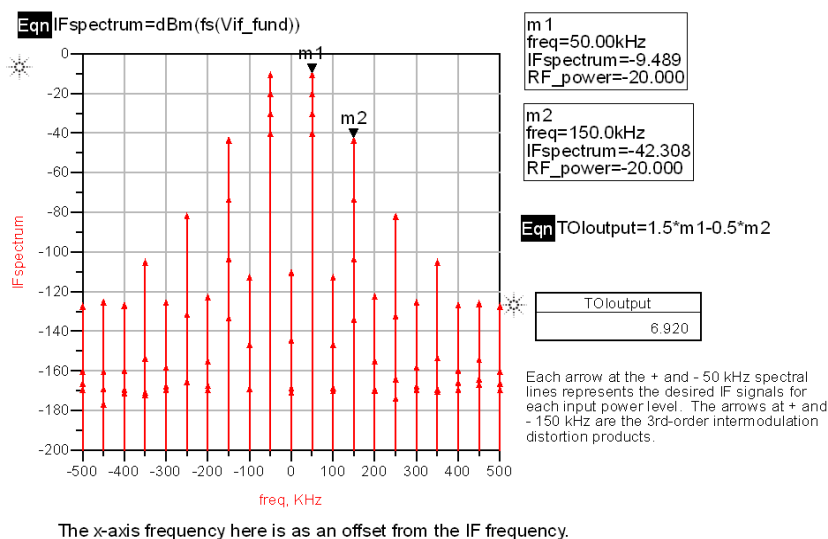


图 4.87 电路包络仿真的结果显示

## 4.7 瞬态仿真

瞬态仿真是时域仿真，这种仿真直接在时域给出电压、电流和相关参量的变化特性。瞬态仿真最早在 SPICE 软件中采用，是仿真采用的传统方式，但随着频率的升高，SPICE 软件很难发挥它的作用，因为根据奈奎斯特准则，软件的采样必须是射频频率的两倍以上，例如当频率为 4GHz 时，软件每秒至少处理  $8 \times 10^9$  个点的数据，所以 SPICE 软件一般不处理频率高的电路系统。瞬态仿真是解决一组时变电压和时变电流的微积分方程，仿真结果对扫描变量是非线性的，与传统 SPICE 软件相比，ADS 软件瞬态分析有很多优点，例如可以直接使用频域分析模型，对微带线和分布参数滤波器等进行分析。本节将介绍瞬态仿真的基本功能，

主要介绍瞬态仿真面板、瞬态仿真控件、仿真的相关参数和参数的设置方法等关于瞬态仿真的基本内容。

### 4.7.1 仿真界面

ADS 原理图中有专门针对瞬态仿真的元件面板，如图 4.88 所示，元件面板中列出了瞬态仿真的所有仿真控件。

在图 4.88 所示的瞬态仿真面板上，有多个瞬态仿真控件，下面将对这多个瞬态仿真控件分别加以说明。

#### 1. 瞬态仿真控制器 (Trans)

瞬态仿真控制器是控制瞬态仿真的最主要控件，使用瞬态仿真控制器可以进行仿真时间设置、仿真综合设置、卷积设置和频率设置等。



图 4.88 瞬态仿真面板

## 2. 瞬态仿真设置控制器 (Options)

瞬态仿真设置控制器主要用来设置瞬态仿真的外部环境 and 计算方式, 如环境温度、设备温度、仿真的收敛性、仿真的状态提示和输出文件的特性等相关内容。

## 3. 参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)

参数扫描计划控制器主要用来控制仿真中的参数扫描计划, 用户可以通过这个控制器添加一个或多个扫描变量, 并制订相应的扫描计划。

## 4. 参数扫描控制器 (Parameter Sweep)

参数扫描控制器用来控制仿真中的扫描参数, 这个扫描参数可以对多个仿真的仿真实例进行扫描。

## 5. 节点设置 (Ndset) 与节点名 (Ndset Name) 控件

节点设置与节点名控件用来设置瞬态仿真的相关节点以及节点名称, 并可以设置插入节点处的参考电压等。

## 6. 显示模板控件 (Display Template)

显示模板控件用来设置显示模板, 显示模板用来设置仿真结果的显示方式。

## 7. 仿真测量等式控件 (MeasEqn)

仿真测量等式控件用来添加一个或多个仿真测量等式, 在仿真结束后, 这个等式的结果将包含在仿真结果的数据组中。

## 8. 电流中心频率观察控件 (Ifc Tran) 和电流频谱观察控件 (Ispec Tm)

电流中心频率观察控件和电流频谱观察控件用来观察电流的中心频率和频谱信息。

## 9. 功率谱中心频率观察控件 (Pfc Tran) 和功率谱观察控件 (Pspec Tran)

功率谱中心频率观察控件和功率谱观察控件用来观察功率谱的中心频率和频谱信息。

## 10. 电压中心频率观察控件 (Vfc Tran) 和电压频谱观察控件 (Vspec Trn)

电压中心频率观察控件和电压频谱观察控件用来观察电压的中心频率和频谱信息。

### 4.7.2 仿真操作

在执行瞬态仿真前, 需要对瞬态仿真控件的参数进行设置, 软件是根据各个参数来执行仿真的。在瞬态仿真的多个控件中, 只有瞬态仿真控制器 (Trans) 是必须要设置的, 其他控件根据需求来决定是否需要设置。下面介绍瞬态仿真中的相关参数, 并给出设置参数的方法。

#### 1. 瞬态仿真控制器

在进行瞬态仿真前, 需要将瞬态仿真控制器 (Trans) 插入原理图中并进行设置, 下面给出瞬态仿真控制器各个参数的设置方法和含义。

##### 1) 瞬态仿真控制器参数设置的操作步骤

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择瞬态仿真【Simulation-Transient】项, 元件面板上出现瞬态仿真的多个控件图标。


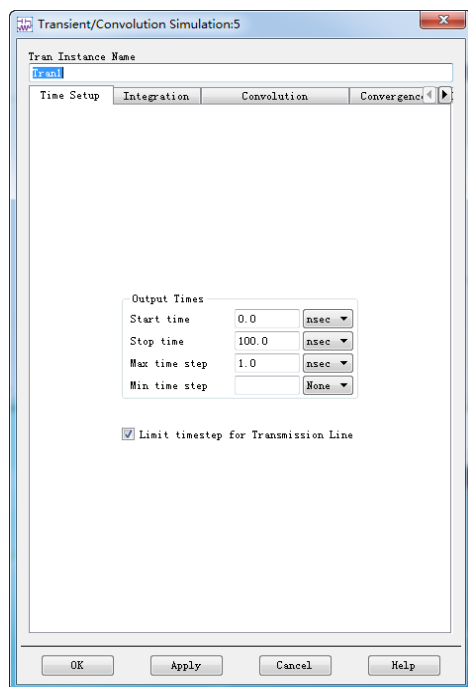
(2) 在瞬态仿真元件面板上, 单击瞬态仿真控制器 (Trans), 然后再单击原理图的画图区, 将瞬态仿真控制器插入原理图的画图区。单击工具栏中的  按钮, 结束当前命令。这时原理图如图 4.89 所示, 这是瞬态仿真控制器的默认状态, 在进行瞬态仿真前, 需要对图 4.89 所示的瞬态仿真控制器进行设置。



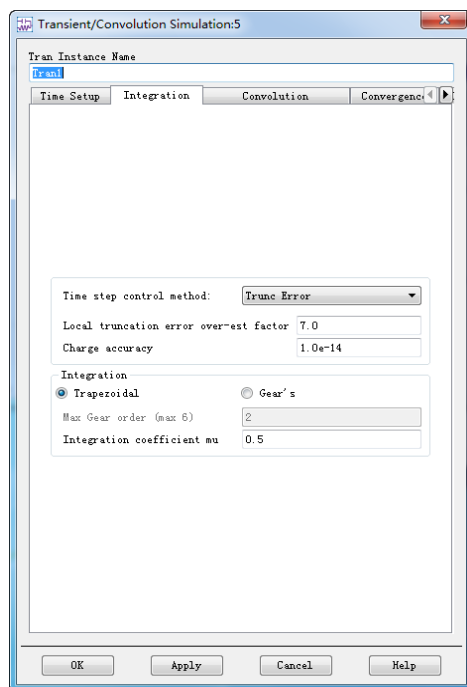
图 4.89 原理图中瞬态仿真控制器的默认状态

(3) 双击原理图画图区的仿真控制器 (TRANSIENT), 出现【TranSient/Convolution Simulation】对话框, 对话框中有【Time Setup】、【Integration】、【Convolution】、【Convergence】、【Options】、【Noise】、【Freq】、【Output】和【Display】等项, 在对话框中可以对这些项进行参数设置。

(4) 【Transient/Convolution Simulation】对话框中的【Time Setup】(时间设置) 和【Integration】(综合参数设置) 项, 如图 4.90 所示, 其中【Time Setup】项用来设置仿真中的起始时间、终止时间和时间间隔等, 【Integration】项用来设置综合模式和扫描偏移量等底层参数。



(a) 时间设置界面



(b) 综合参数设置界面

图 4.90 瞬态仿真中时间设置和综合参数设置的设置界面

(5) 【Transient/Convolution Simulation】对话框中的【Convolution】(卷积参数设置) 和【Options】(仿真参量设置) 项, 如图 4.91 所示, 其中【Convolution】项用来设置卷积参数, 【Options】项用来设置仿真参量。

## 2) 瞬态仿真控制器中参数的含义和设置方法

瞬态仿真控制器中需要对时间参数、综合参数、卷积参数和仿真参量等进行设置, 下面分别列表对时间参数、综合参数、卷积参数加以描述。

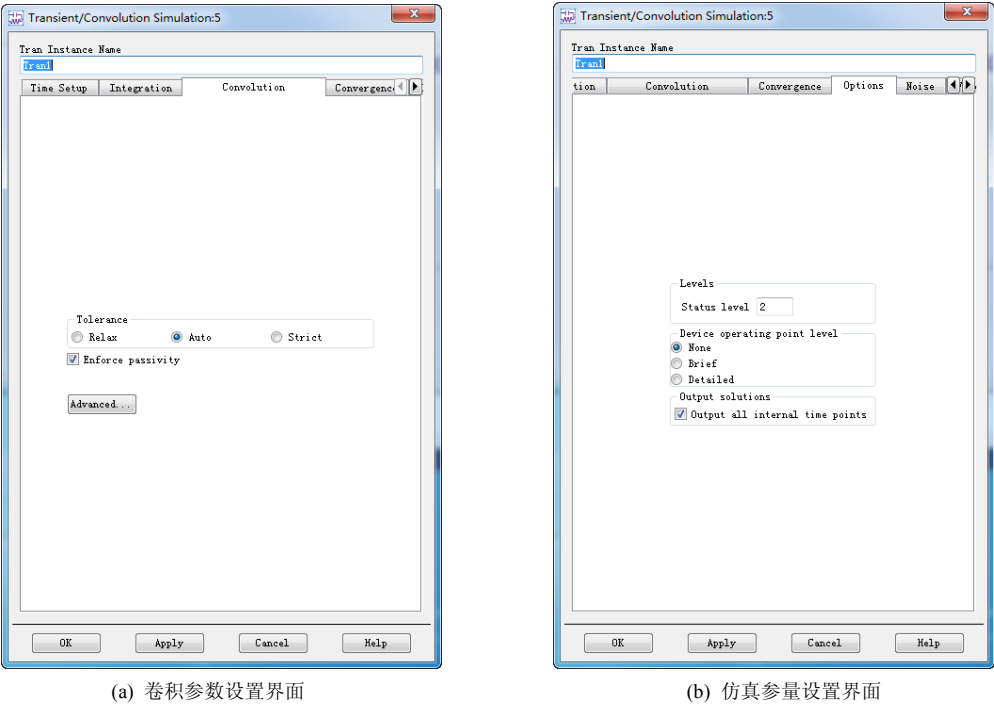


图 4.91 瞬态仿真中卷积参数和仿真参量的设置界面

(1) 时间参数。时间参数设置用来设置仿真中的起始时间、终止时间和时间间隔等。时间参数设置在瞬态仿真控制器设置窗口中的【Time Setup】项中设置，时间参数设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.16 所示。

表 4.16 时间参数

参数名称	参数描述	备注
Start time	仿真执行的起始时间	无
Stop time	仿真执行的终止时间	无
Max time step	仿真执行的最大时间间隔	时间间隔的设置决定了带宽，若时间间隔为 $T$ ，系统允许的最大带宽为 $\pm 0.5/T$
Min time step	仿真执行的最小时间间隔	无

(2) 综合参数设置。综合参数设置项用来设置综合模式和扫描偏移量等底层参数。综合参数在瞬态仿真控制器设置窗口中的【Integration】项中设置，综合参数设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.17 所示。

表 4.17 综合参数

参数名称	参数描述	备注
Time step control method	时间间隔控制方法	Fixed 表示仿真中采用固定的时间间隔。 Iteration count 表示仿真中采用牛顿-莱布尼兹算法。 Trunc Error 表示仿真中采用遇错随机切断的算法
Local truncation error over-est factor	Trunc Error 算法的估算因子	默认值为 7.0
Charge accuracy	Trunc Error 算法的精确度	默认值为 1.0e-14
Integration	执行仿真采用的综合算法	Trapezoidal 和 Gear 表示仿真中采用的算法
Max Gear order	最大多项式次数	当综合算法选择 Gear 时有效
Integration coefficient mu	综合系数	当综合算法选择 Trapezoidal 时有效

(3) 卷积参数设置。卷积参数设置项用来设置卷积时的相关参数。卷积参数在瞬态仿真控制器设置窗口中的【Convolution】项中设置，卷积参数设置中的参数名称、参数含义和备注如表 4.18 所示。

表 4.18 卷积参数

参数名称	参数描述	备注
Use approximate models when available	应用近似模型	选中此项将在仿真中使用近似模型进行卷积分析
Approximate Short Transmission lines	传输线延时值	射频时传输线具有延时效应，此项用于设置延时参数
Max Frequency	最大频率	用来确定在频域分析时元件的最大频率值
Delta Frequency	频率变化值	在频域分析时频率的间隔
Max impulse Sample points	最大采样点数	单位脉冲响应的最大采样点数
Relative impulse truncation factor	相对脉冲截断系数	脉冲截断系数的相对值
Absolute impulse truncation factor	绝对脉冲截断系数	脉冲截断系数的绝对值
Convolution interpolation order	内插次数	设定卷积分析的内插次数
Convolution mode	卷积模式	Discrete 为离散分析模式。 PWL Continuous 为连续分析模式
Smoothing window type	平滑窗口类型	选择 Rectangle 时，平滑窗口为矩形窗。 选择 Hanning 时，平滑窗口为汉明窗
Non-causal fcn imp response length	非关联的相应脉冲长度	

### 3) 瞬态仿真控制器参数的显示

当设置完成瞬态仿真控制器中的参数后，可以在原理图中将设置结果显示出来。显示设置结果的操作步骤如下。

(1) 双击原理图画图区中的瞬态仿真控制器 (TRANSIENT)，出现【Transient/ Convolution Simulation】对话框。

(2) 对话框中的【Display】项，用来显示设置完成的参数。如果希望显示某参量，需要选中某参数，如图 4.92 所示。

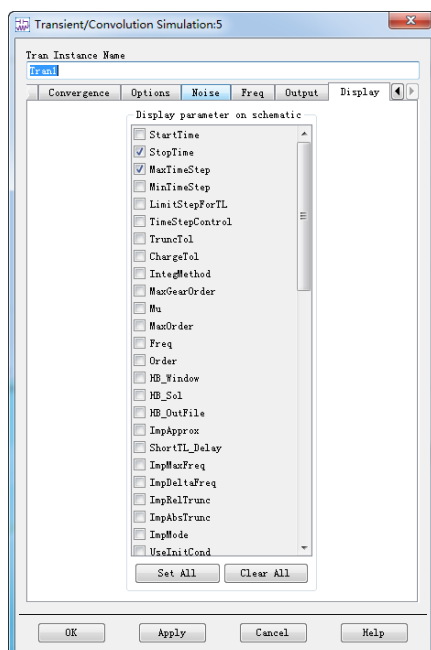


图 4.92 瞬态仿真控制器中的显示项界面

(3) 单击【Transient/Convolution Simulation】对话框中的【OK】按钮, 关闭对话框, 完成原理图中瞬态仿真控制器的设置。如果将【Transient/Convolution Simulation】对话框中【Display】项的所有参数都选中, 原理图中会显示出瞬态仿真控制器的所有参数, 如图 4.93 所示。

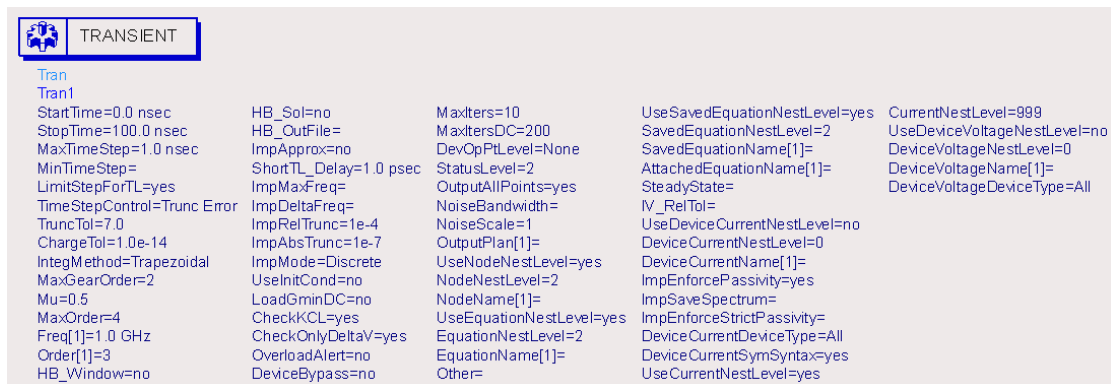


图 4.93 原理图中显示所有参量的电路包络仿真控制器

图 4.89 与图 4.93 都是插入原理图中的瞬态仿真控制器, 图 4.89 是未设置的状态, 图 4.93 是设置后的状态。实际上, 大多数瞬态仿真控制器只有少数参量需要设置, 大部分参量都保持默认状态。

## 2. 电流中心频率观察控件和电流频谱观察控件

可以设置并显示电流中心频率观察控件和电流频谱观察控件, 图 4.94 中显示了它们可以设置的参量。

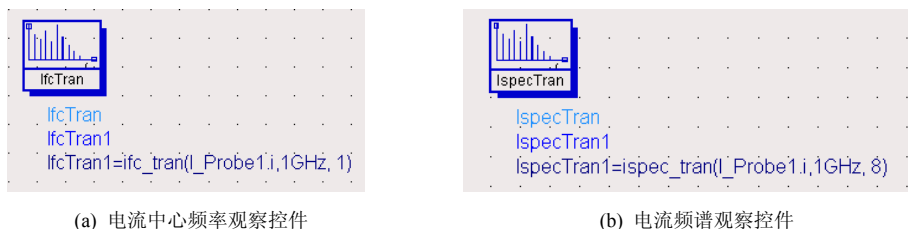


图 4.94 电流中心频率观察控件和电流频谱观察控件

## 3. 功率谱中心频率观察控件和功率谱观察控件

可以设置并显示功率谱中心频率观察控件和功率谱观察控件, 图 4.95 中显示了它们可以设置的参量。

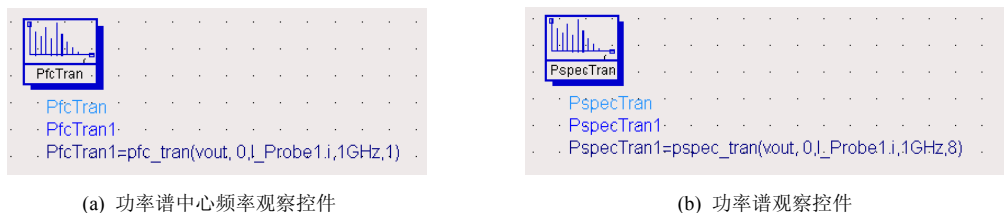


图 4.95 功率谱中心频率观察控件和功率谱观察控件



#### 4. 电压中心频率观察控件和电压频谱观察控件

可以设置并显示电压中心频率观察控件和电压频谱观察控件,图 4.96 中显示了它们可以设置的参量。

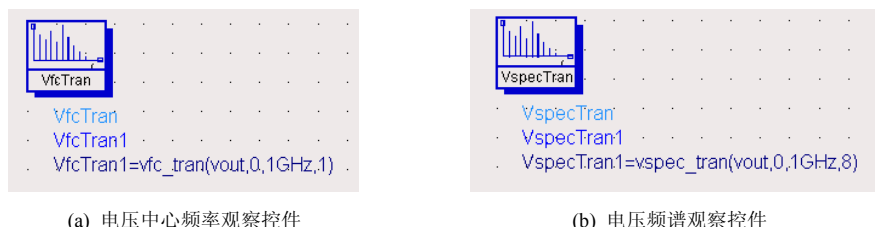


图 4.96 电压中心频率观察控件和电压频谱观察控件

#### 5. 其他瞬态仿真控件

其他瞬态仿真控件包括瞬态仿真设置控制器 (Options)、参数扫描计划控制器 (Sweep Plan)、参数扫描控制器 (Parameter Sweep)、节点设置 (Ndset) 控件、节点名 (Ndset Name) 控件、显示模板控件 (Display Template) 和仿真测量等式控件 (MeasEqn), 这些瞬态仿真中的控件与直流仿真中的相应控件意义和功能基本相同, 这里不再赘述。

#### 4.7.3 仿真例程


ADS 软件有自带的瞬态仿真例程, 这个例程可以帮助读者了解瞬态仿真的基本内容和基本方法。本节将给出这个瞬态仿真例程的电路原理图, 并将瞬态电路原理图的仿真结果显示出来。

##### 1. 瞬态仿真例程的原理图

###### 1) 打开原理图

在 ADS 主视窗打开谐波平衡仿真例程原理图, 打开原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件, 弹出主视窗。

(2) 单击主视窗工具栏中的  按钮, 在文件管理区可以看到 examples 文件夹及其内容, 文件夹内是所有的例程。双击 examples 文件夹中的 Tutorial 文件夹, 进入 Tutorial 文件夹。

(3) 双击 Tutorial 文件夹中的 SimModels\_wrk.7zads, 将其解压到当前工作目录。

(4) 单击项目浏览区的设计 TRAN1, 出现 TRAN1 的 schematic 文件, 再双击该文件, 就可以打开瞬态仿真原理图了。瞬态仿真原理图如图 4.97 所示。

###### 2) 原理图说明

瞬态仿真原理图由混频器 GilCellMix、直流电压源、时域电压源、带通滤波器、终端负载和瞬态仿真控制器构成, 下面对上述构成元件加以说明。

###### (1) 混频器。

在如图 4.97 所示的原理图电路中, 混频器 GilCellMix 有子电路, 这个混频器的参数主要是由子电路决定的。单击原理图工具栏中的  按钮, 然后单击原理图中的 GilCellMix 符号, 可以查看一个母电路 GilCellMix 的子电路内容。混频器的三个端口如下。

① 射频输入端 RF。

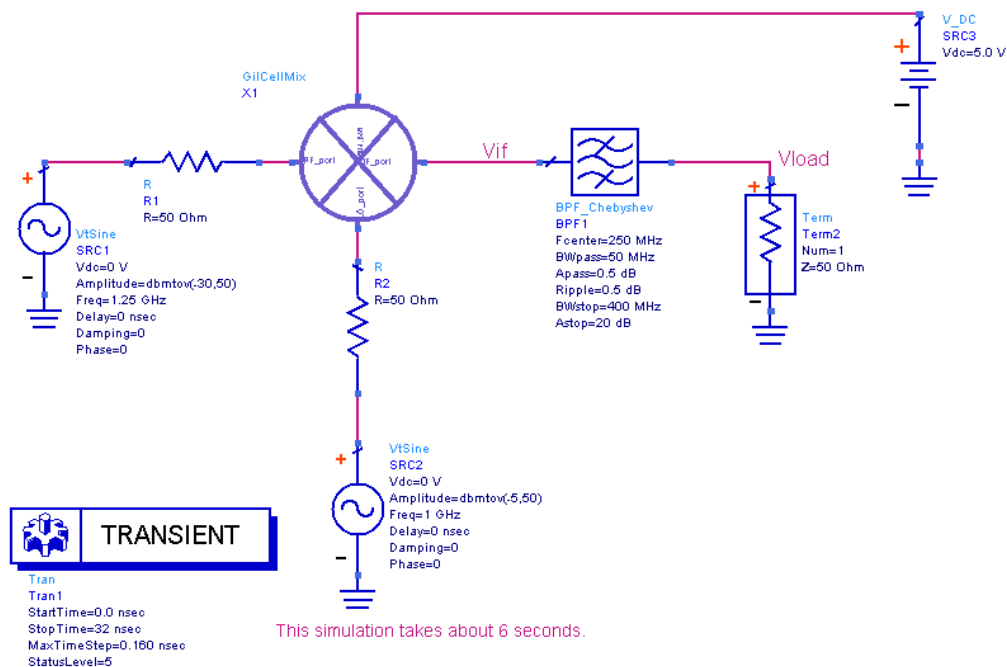


图 4.97 瞬态仿真原理图

② 本振输入端 LO。

③ 中频输出端 IF。

(2) 直流电压源。

在如图 4.97 所示的原理图中，有直流电压源 V\_DC，这个源参数已经在原理图中显示出来，直流电压源 V\_DC 的电压为 5V。

(3) 时域电压源。

在如图 4.97 所示的原理图中，有两个时域电压源 VtSine，这两个源参数已经在原理图中显示出来，这是两个正弦电压源，已经给出这两个源的振幅和频率等。

(4) 带通滤波器。

在如图 4.97 所示的原理图中，有带通滤波器 BPF\_Chebyshev，原理图给出了滤波器的参数指标，带通滤波器的参数指标如下。

- ① Chebyshev，这是切比雪夫带通滤波器。
- ② Fcenter=250MHz，带通滤波器的中心频率为 250MHz。
- ③ BWpass=50MHz，带通滤波器的带宽为 50MHz。
- ④ Apass=0.5dB，带通滤波器通带衰减为 0.5dB。
- ⑤ Ripple=0.5dB，带通滤波器通带内波纹为 0.5dB。
- ⑥ BWstop=400MHz，带通滤波器的阻带频率为 400MHz。
- ⑦ Astop=20dB，带通滤波器阻带衰减为 20dB。

(5) 瞬态仿真控制器。


在如图 4.97 所示的原理图中，有瞬态仿真控制器 TRANSIENT，瞬态仿真控制器用来设置瞬态仿真的参数，这里瞬态仿真控制器的设置如下。

- ① StartTime=0.0nsec, 表示仿真的起始时间为 0.0ns。
- ② StopTime=32nsec, 表示仿真的终止时间为 32ns。
- ③ MaxTimestep=0.160nsec, 表示仿真的时间间隔为 0.160ns。
- ④ StatusLevel=5, 表示仿真执行的参数为 5。

## 2. 瞬态仿真例程的仿真结果

### 1) 原理图仿真

(1) 可以在数据显示视窗查看原理图仿真结果, 查看仿真结果的步骤如下。

- ① 在瞬态仿真原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。
- ② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 仿真结果显示的方式是设定好的。

(2) 还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中, 可以直接查看, 查看的步骤如下。

① 在瞬态仿真原理图视窗中, 选择【Window】→【Open Data Display】命令, 弹出【Open Data Display】对话框。

② 在【Open Data Display】对话框中, 单击【TRAN 1.dds】项, 选择查看瞬态仿真原理图的仿真结果, 然后单击对话框中的【打开】按钮, 关闭对话框。

③ 当【Open Data Display】对话框关闭后, 仿真结果会自动弹出。

### 2) 仿真结果显示

当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 仿真结果显示的方式是设定好的, 数据显示视窗会自动显示仿真结果, 如图 4.98、图 4.99 和图 4.100 所示。

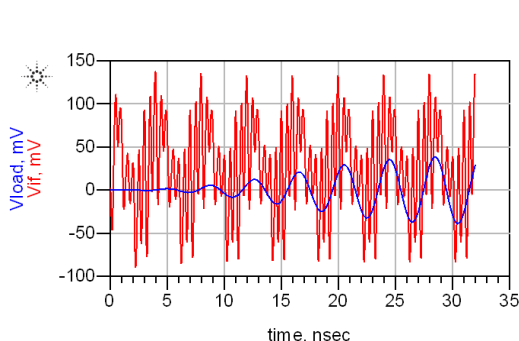


图 4.98 Vif 和 Vload 的时域波形

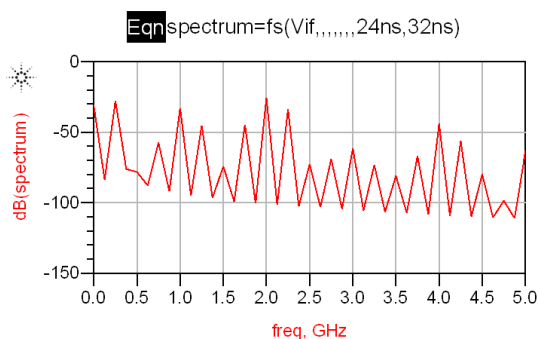


图 4.99 Vif 的频谱和 Vif 频谱的方程

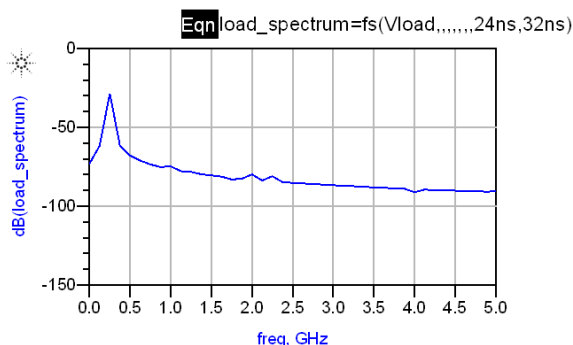


图 4.100 Vload 的频谱和 Vload 频谱的方程

(1) 混频后的信号在中频输出端 IF 输出,  $V_{if}$  是滤波前的中频输出,  $V_{load}$  是滤波后的中频输出,  $V_{if}$  和  $V_{load}$  的时域波形如图 4.98 所示。

(2) 在数据显示视窗显示了  $V_{if}$  中频输出的频谱, 并给出了  $V_{if}$  频谱的计算方程,  $V_{if}$  频谱和  $V_{if}$  频谱的计算方程如图 4.99 所示。

(3) 在数据显示视窗显示了  $V_{load}$  中频输出的频谱, 并给出了  $V_{load}$  频谱的计算方程,  $V_{load}$  频谱和  $V_{load}$  频谱的计算方程如图 4.100 所示。

## 习题

1. 本章介绍了 ADS 各种基本仿真功能, 请读者结合实例加以熟悉和掌握。
2. 请分析 ADS 各种基本仿真功能的应用条件, 并总结应用的经验。
3. 物联网射频电路的特性主要由 S 参数来表示, 所以 S 参数仿真是射频电路最重要的仿真方法, 请列举出其应用场合。
4. 简述 ADS 各种基本仿真功能的联系与区别。
5. 在熟悉基本仿真功能的基础上, 请结合多个仿真功能的运用, 设计一个综合运用的例子。(自拟)

## 第5章 ADS 通信系统仿真

ADS 软件不仅可以提供电路的设计与仿真，而且可以提供系统级设计与仿真。一个射频系统可以由发射系统或接收系统构成，当射频系统构成后，可以对射频系统进行仿真。在 ADS 软件中，发射或接收系统是由系统级元件构成的，在系统级元件中可以设置期望的元件特性，这些系统元件随后可以由独立电路代替。

射频系统主要由系统级滤波器、系统级放大器和系统级混频器等系统级元件构成，对射频系统可以进行 S 参数仿真或谐波平衡仿真等多种形式的仿真。本章将首先给出射频系统设计与仿真基础，然后给出一个 ADS 软件的系统仿真例程。

### 5.1 设计基础级通信系统

本节将创建一个项目，本章后续系统级设计与仿真的工作都将在这个项目中完成。在这个项目中，本节会创建原理图，并在原理图中搭建射频系统，完成原理图的设计与仿真工作。

#### 5.1.1 新建工程

##### 1. 创建项目

使用主视窗创建项目，这个项目的名称定为 system。创建项目的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。

(2) 选择主视窗中的【File】→【New Workspace】命令，会弹出【New Workspace Wizard】对话框，在【New Workspace Wizard】对话框中，单击【Next】按钮，项目名称为 MyWorkspace。

(3) 单击【Finish】按钮，完成创建项目。

##### 2. 创建原理图

选择主视窗中的【File】→【New Schematic】命令，弹出【New Schematic】对话框，在【New Schematic】对话框中，做如下设置。

(1) 输入新建原理图的名称为 RF\_system1。

(2) 选择【Schematic Design Templates】为 none。

(3) 单击【OK】按钮，完成创建原理图的工作。

##### 3. 搭建原理图

这里设计一个射频收发系统，该系统在物联网中被广泛地运用，如车辆监控、遥控、遥测、小型无线网络、无线抄表、门禁系统、小区传呼、工业数据采集系统、无线标签、身份识别、非接触 RF 智能卡、小型无线数据终端、安全防火系统、无线遥控系统、水文气象监控、机器人控制、数字音频、数字图像传输等。其中门禁系统应用频段大致在 13.56MHz，通过射频识别技术，可以实现持有效电子标签的车不停车，方便通行又节约时间，提高路口的通行效率，并对小区或停车场的车辆出入进行实时的监控，维护区域治安。此外还有应用频段较高的 ETC 系

统（电子不停车收费系统）也有广泛应用，频段在 2.4GHz 以上，车辆在通过收费站时，通过车载设备实现车辆识别、信息写入（入口）并自动从预先绑定的 IC 卡或银行账户上扣除相应资金（出口），是世界上最先进的收费系统。总之射频收发系统是物联网应用中不可缺少的重要部件。

这个系统包括滤波器、放大器和混频器等系统级元件，在这个系统级设计中，可以学习系统级原理图的构成和系统级元件参数的设置方法。这里设计的射频接收系统由下列元部件构成。

- ① 带通滤波器，接收到的射频信号首先通过这个带通滤波器。
- ② 放大器，射频信号通过这个放大器进行放大。
- ③ 混频器，这个混频器是一个变频器。
- ④ 本振源。
- ⑤ 低通滤波器，是中频滤波器。

下面将由上述元件搭建原理图电路，用元件搭建原理图电路的基本步骤如下。

(1) 在原理图的元件面板列表上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上，选择负载终端 Term，插入原理图中，定义负载终端 Term 1 为输入端口。

(2) 在原理图工具栏中单击  按钮，将地线（Ground）插入原理图，让负载终端 Term 1 接地。

(3) 在原理图的元件面板列表上，选择带通滤波器【Filters-Bandpass】项，在带通滤波器元件面板上，选择巴特沃兹滤波器（Butterworth），插入到原理图中。

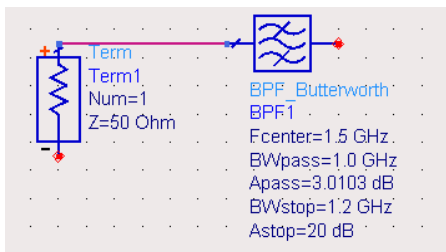



图 5.1 负载终端和带通滤波器连接


(4) 单击工具栏中的  按钮，将原理图中的负载终端 Term 1 和带通滤波器连接起来，连接方式如图 5.1 所示。

(5) 在原理图的元件面板列表上，选择系统放大器与混频器【System-Amps&Mixers】项，在系统放大器与混频器元件面板上，选择放大器 Amp，插入原理图中。

(6) 在原理图的元件面板列表上，选择系统放大器与混频器【System-Amps&Mixers】项，在系统放大器与混频器元件面板上，选择混频器 Mixer，插入原理图中。


(7) 在原理图的元件面板列表上，选择频域源【Sources-Freq Domain】项，在频域源元件面板上，选择单频电压源 V\_1Tone，插入原理图中。

(8) 在原理图的元件面板列表上，选择集总参数元件【Lumped-Components】项，在集总参数元件面板上，选择电阻 R，插入原理图中。

(9) 单击工具栏中的  按钮，将原理图中的放大器、混频器、电压源、电阻和带通滤波器连接起来，连接方式如图 5.2 所示。

(10) 在原理图的元件面板列表上，选择带通滤波器【Filters-Lowpass】项，在带通滤波器元件面板上，选择切比雪夫滤波器 Chbshv，插入原理图中。

(11) 在原理图的元件面板列表上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，在 S 参数仿真元件面板上，选择负载终端 Term，插入到原理图中，定义负载终端 Term2 为输出端口。

(12) 在原理图工具栏中单击  按钮，将地线（Ground）插入原理图，让负载终端 Term2 接地。

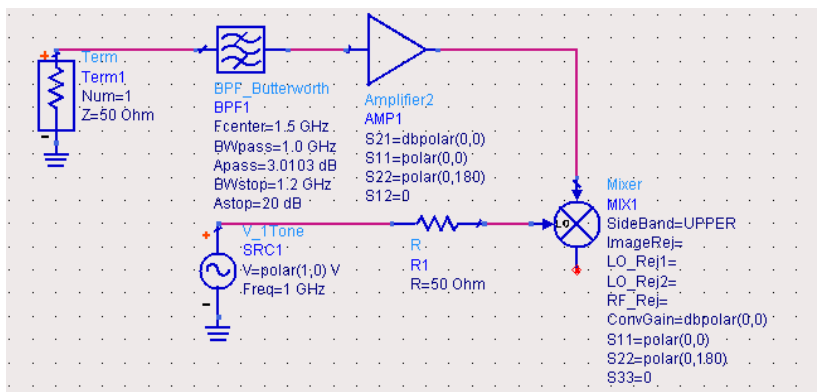



图 5.2 放大器、混频器、电压源、电阻和带通滤波器连接

(13) 单击工具栏中的  按钮，将原理图中的混频器、带通滤波器和终端负载连接起来，连接方式如图 5.3 所示，这是搭建完成的射频接收系统原理图。

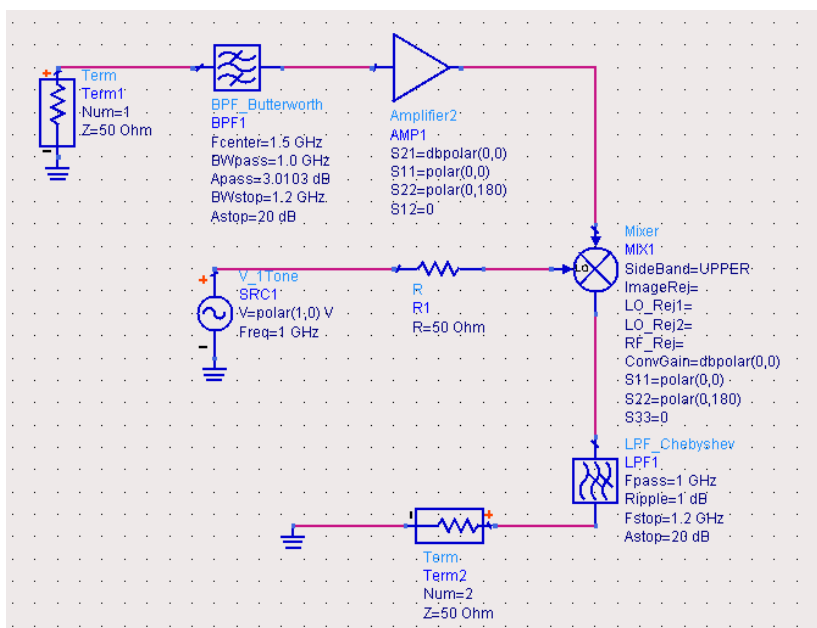


图 5.3 搭建完成的射频接收系统原理图

#### 4. 设置原理图中元件的参数

下面对图 5.3 所示的原理图设置参数，需要设置参数的元件有带通滤波器、放大器、混频器、电压源和低通滤波器，各元件参数设置的指标如下。

##### (1) 带通滤波器。

- ① BPF\_Butterworth，这是巴特沃兹带通滤波器。
- ② Fcenter=1.9GHz，带通滤波器的中心频率为 1.9GHz。
- ③ BWpass=200MHz，带通滤波器的带宽为 200MHz。
- ④ Apass=3dB，带通滤波器通带最大衰减为 3dB。
- ⑤ BWstop=1GHz，带通滤波器的阻带频率为 1GHz。
- ⑥ Astop=25dB，带通滤波器阻带衰减为 25dB。

(2) 放大器。

① Amplifier, 这是放大器。

②  $S21=dbpolar(10, -180)$ , 表示放大器的增益为 10dB。

③  $S11=polar(0, 0)$ , 表示放大器输入端口的反射系数为 0。

④  $S22=polar(0, 180)$ , 表示放大器输出端口的反射系数为 0。

⑤  $S12=0$ , 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。

(3) 混频器。

① Mixer, 这是混频器。

② SideBand=LOWER, 表示选择下边带。

③ ConvGain=dbpolar(3, 0), 表示混频器的转换增益为 3dB。

④  $S11=polar(0, 0)$ , 表示混频器端口 1 的反射系数为 0。

⑤  $S22=polar(0, 180)$ , 表示混频器端口 2 的反射系数为 0。

⑥  $S33=0$ , 表示混频器端口 3 的反射系数为 0。

(4) 单频电压源。

① V\_1 Tone, 这是单频电压源。

②  $V=polar(1, 0)$  V, 表示单频电压源的电压为 1。

③ Freq=1.8GHz, 表示单频电压源的频率为 1.8GHz。

(5) 低通滤波器。

① LPF\_Chebyshev, 这是切比雪夫低通滤波器。

② Fpass=0.2GHz, 低通滤波器的带宽为 200MHz。

③ Ripple=0.5dB, 低通滤波器通带内波纹为 0.5dB。

④ Fstop=1 GHz, 低通滤波器的阻带频率为 1GHz。

⑤ Astop=25dB, 低通滤波器阻带衰减为 25dB。

参数设置完成的射频接收系统原理图如图 5.4 所示。

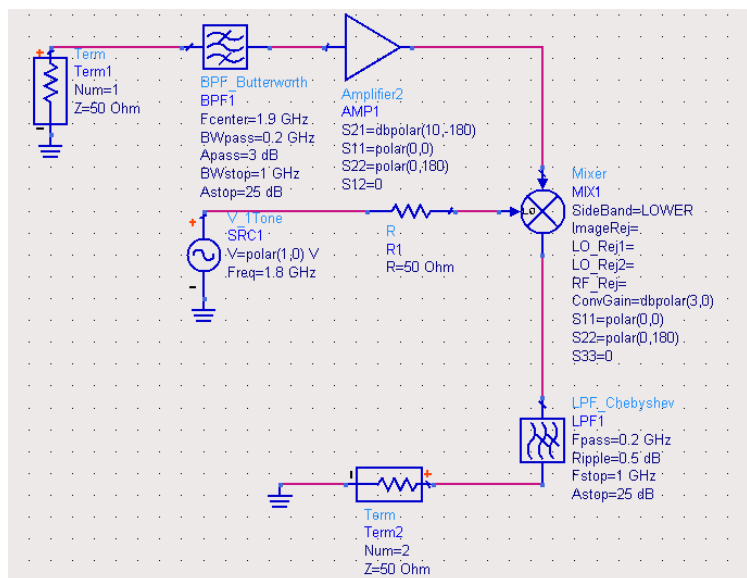


图 5.4 参数设置完成的射频接收系统原理图



## 5.1.2 通信系统仿真操作

### 1. S 参数仿真

下面我们对原理图进行在如图 5.4 所示的原理图中插入 S 参数仿真控制器，并对 S 参数仿真控制器进行设置，然后就可以对原理图进行 S 参数仿真了。

#### 1) 在原理图中插入 S 参数仿真控制器

在如图 5.4 所示的原理图中，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上，选择 S 参数仿真控制器 SP，插入原理图中，表明将要做 S 参数仿真。

#### 2) 对 S 参数仿真控制器进行设置

双击原理图中的 S 参数仿真控制器，打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框，对话框中有【Frequency】、【Parameters】和【Display】等项，在对话框中可以对这些项进行参数设置，这里设置的结果如下。

##### (1) 设置【Frequency】项。

① 扫描的起始值设为 1GHz。

② 扫描的终止值设为 3GHz。

③ 扫描的间隔设为 100MHz。

设置完成的【Frequency】项，如图 5.5 所示。

##### (2) 设置【Parameters】项。

① 选择【Enable AC frequency conversion】项。

② 其他选项保持默认状态。

设置完成的【Parameters】项，如图 5.6 所示。

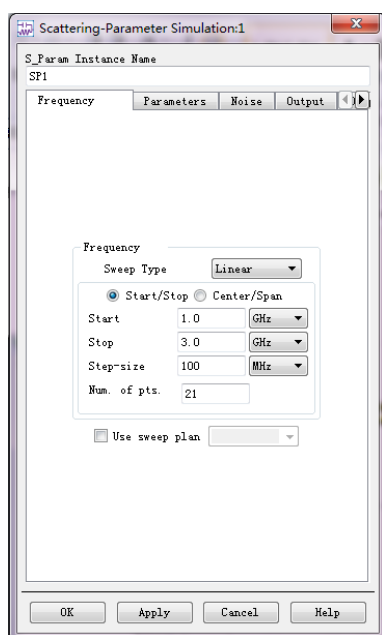


图 5.5 设置完成的【Frequency】项

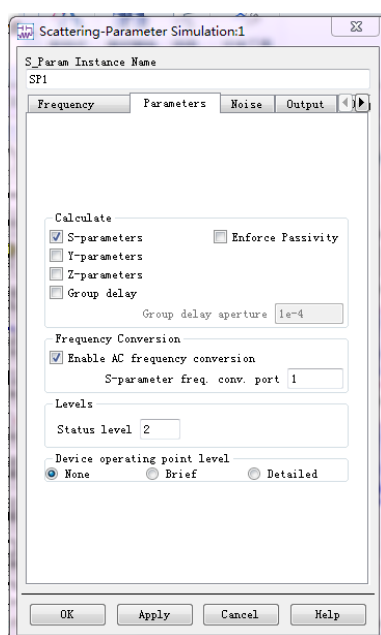


图 5.6 设置完成的【Parameters】项

(3) 设置【Display】项。

① 选中【FreqConversion】项。

② 选中【FreqConversionPort】项。

设置完成的【Display】项，如图 5.7 所示。

(4) 原理图中设置完成的 S 参数仿真控制器。

单击【Scattering-Parameter Simulation】对话框中的【OK】按钮完成设置，原理图中设置完成的 S 参数仿真控制器如图 5.8 所示。

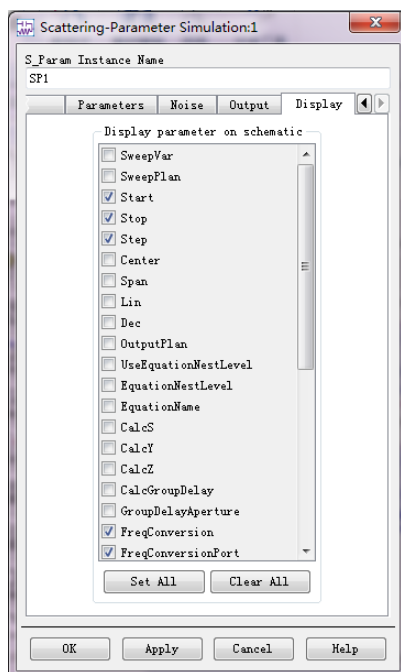


图 5.7 设置完成的 Display 项

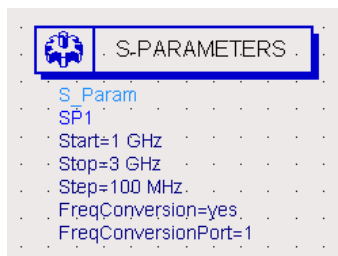


图 5.8 设置完成的 S 参数仿真控制器

3) 对原理图进行 S 参数仿真

(1) 对原理图执行 S 参数仿真。

① 选择原理图菜单栏中的【Simulate】→【Simulation Settings】命令，打开【Simulation Settings】对话框，将对话框中的名称改为 RF\_system1\_10dB，如图 5.9 所示。

② 单击【Apply】和【Simulate】按钮，运行仿真。

③ 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入 S21 的矩形图，显示 S21 的仿真结果。

④ 在 S21 曲线的 1.9GHz 处，插入一个标记 marker，可以显示 1.9GHz 处的增益。

数据显示视窗如图 5.10 所示。

(2) 提高放大器增益后对原理图再次执行 S 参数仿真。

① 修改原理图中的参数，将放大器的增益由 10dB 修改为 20dB。

② 选择原理图菜单栏中的【Simulate】→【Simulation Setting】命令，打开【Simulation Setting】对话框，将对话框中的名称改为 RF\_system 1\_20dB。

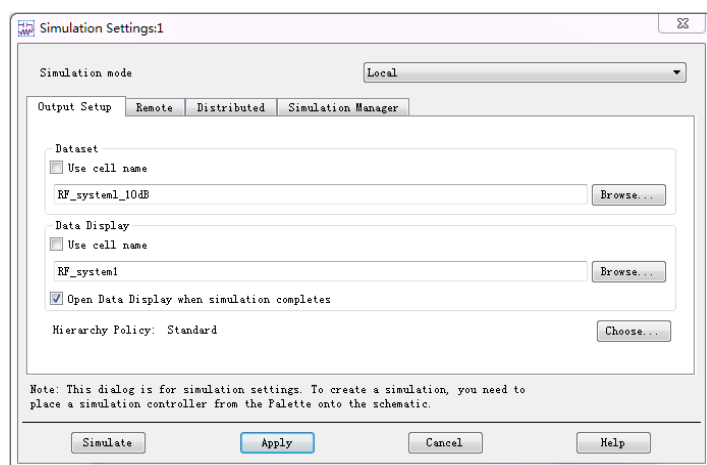


图 5.9 设置完成的【Simulation Setting】对话框

- ③ 单击【Apply】和【Simulate】按钮，运行仿真。
- ④ 当仿真结束后，弹出如图 5.11 所示的对话框，单击【No】按钮，关闭对话框。

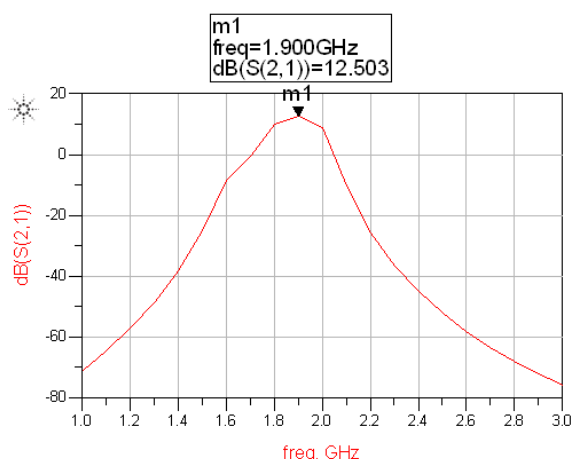


图 5.10 放大器增益为 10dB 时的 S21 曲线

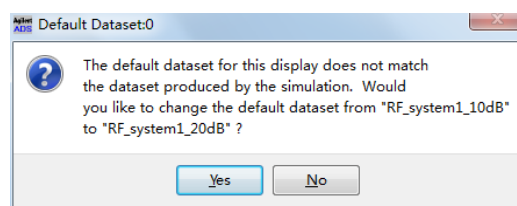


图 5.11 是否改变数据组对话框

- ⑤ 数据显示视窗会自动弹出，显示 S21 的仿真结果。
- ⑥ 双击数据显示视窗中的 S21 矩形框，会弹出【Plot Trace & Attributes】对话框，在【Plot Trace & Attributes】对话框中，选择【RF\_system1\_20dB】选项，如图 5.12 所示。
- ⑦ 在【Plot Trace & Attributes】对话框中，选择 S21 曲线，然后关闭【Plot Trace & Attributes】对话框，这时数据显示视窗中的 S21 矩形框会同时出现 RF\_system1\_10dB 和 RF\_system1\_20dB 两组曲线。
- ⑧ 在 RF\_system1\_20dB 曲线上的 1.900GHz 处，插入一个标记 marker，可以显示 1.900GHz 处的增益。数据显示视窗如图 5.13 所示。

## 2. 谐波平衡仿真

在对原理图进行谐波平衡仿真之前，需要对原理图进行修改。下面将修改原理图，并对修改后的原理图进行谐波平衡仿真。

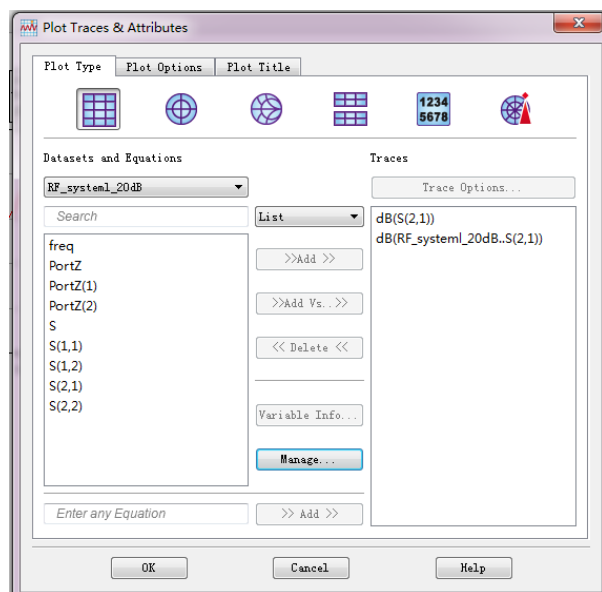


图 5.12 添加 20dB 时的【Plot Trace &amp; Attributes】对话框

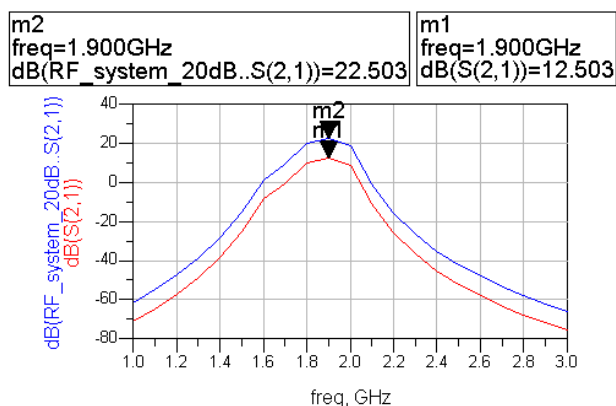


图 5.13 放大器增益为 10dB 和 20dB 时的 S21 曲线

1) 另存并修改原理图

(1) 另存原理图。

在原理图 RF\_system1 上, 选择【File】→【Save As】命令, 弹出【Save Design As】对话框, 在【Save Design As】对话框中, 输入文件名 RF\_system2, 然后单击【OK】按钮, 将原理图另存为 RF\_system2。

(2) 在原理图 RF\_system2 上进行修改, 修改时首先删除一些元件, 删除的元件如下。

- ① 终端负载 Term1。
- ② V\_1 Tone 单频电压源、50Ω 电阻。
- ③ S 参数仿真控制器。

(3) 在原理图中选择频域源【Sources-Freq Domain】元件面板, 在电路的输入端插入单频功率源 P\_1Tone, 对单频功率源 P\_1 Tone 设置如下。

- ① P=polar (dbmtow (-40), 0), 表示单频功率源输出信号的功率为-40dBm。
- ② Freq=1.9GHz, 表示单频功率源的频率为 1.9GHz。

(4) 在原理图中选择频域源【Sources-Freq Domain】元件面板，在电路的本振端插入单频功率源 P\_1 Tone，对单频功率源 P\_1 Tone 设置如下。

①  $P=\text{Polar}(\text{dbmtow}(0), 0)$ ，表示单频功率源输出信号的功率为 0dBm。

②  $\text{Freq}=1.8\text{GHz}$ ，表示单频功率源的频率为 1.8GHz。

(5) 在原理图的输出端，插入节点 Vout。

(6) 在原理图中，插入谐波平衡仿真控制器，对谐波平衡仿真控制器设置如下。

①  $\text{Freq}[1]=1.8\text{GHz}$ ，表示谐波平衡仿真的第一个基准频率为 1.8GHz。

②  $\text{Freq}[2]=1.9\text{GHz}$ ，表示谐波平衡仿真的第二个基准频率为 1.9GHz。

③  $\text{Order}[1]=3$ ，表示谐波平衡仿真时第一个基波频率的最大谐波次数为 3。

④  $\text{Order}[2]=3$ ，表示谐波平衡仿真时第二个基波频率的最大谐波次数为 3。

⑤  $\text{MaxOrder}=4$ ，表示谐波平衡仿真时最大混合阶数为 4。

通过上述修改，原理图如图 5.14 所示。

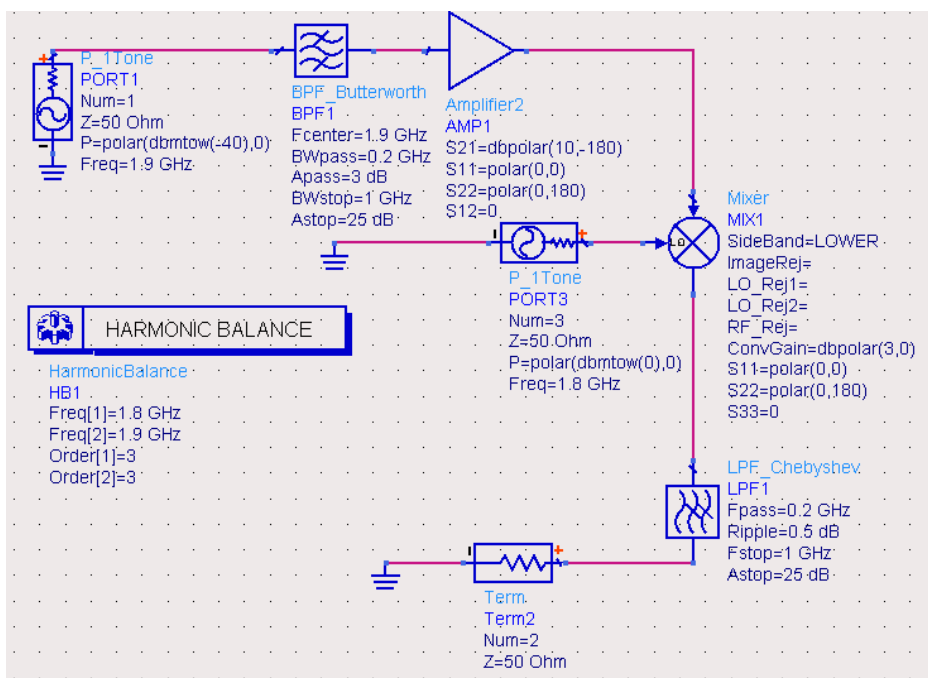



图 5.14 用于谐波平衡仿真的原理图

2) 对原理图进行谐波平衡仿真

(1) 在图 5.14 所示的原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真。

(2) 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入 Vout 的矩形图，显示 Vout 的仿真结果。

(3) 在 Vout 曲线的 100MHz 处，插入一个标记 marker，可以显示 100MHz 处的输出功率。数据显示视窗如图 5.15 所示。

(4) 由图 5.15 可以看出，100MHz 处的输出功率为 -27.497dBm，这时由于输入功率为 -40dBm，S 参数仿真的增益为 12.503dBm，因此输出功率为 -27.497dBm。

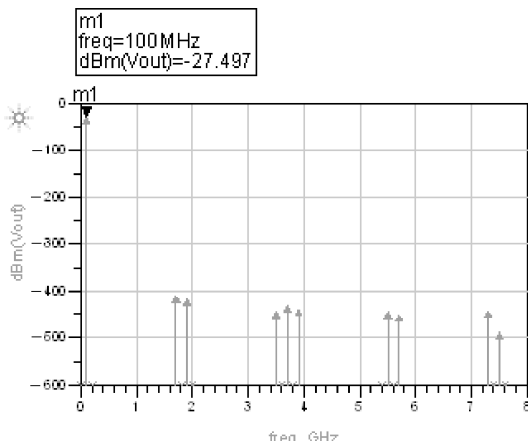


图 5.15 谐波平衡仿真的输出功率谱


## 5.2 通信系统实例分析

ADS 软件有自带的系统级设计与仿真例程，这个例程可以帮助读者了解系统级设计与仿真的基本内容和基本方法。本节将给出这个系统级例程的电路原理图，并将系统级电路原理图的仿真结果显示出来。

### 5.2.1 实例仿真设计

在 ADS 主视窗打开系统级设计与仿真例程原理图，打开原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。

(2) 单击主视窗工具栏中的  按钮，在文件管理区可以看到 examples 文件夹及其内容，文件夹内是所有的例程。双击 examples 文件夹中的 Tutorial 文件夹，进入 Tutorial 文件夹。

(3) 双击 Tutorial 文件夹中的 SimModels\_wrk.7zads，进入 SimModels\_prj 项目，再双击文件浏览区的 networks，在文件浏览区显示出该项目下所有的原理图文件，其中 RF\_SYS1.dsn 为系统级设计与仿真例程原理图。

(4) 双击文件浏览区的 RF\_SYS1.dsn，在项目管理区出现 RF\_SYS1.dsn (Schematic)，再双击项目管理区的 RF\_SYS1.dsn (Schematic)，就可以打开系统级设计与仿真原理图了。系统级设计与仿真原理图 RF\_SYS1.dsn 如图 5.16 所示。

图 5.16 中系统级设计与仿真原理图 RF\_SYS1.dsn 由发射系统、视距传输天线链接系统 LOS\_Link 和接收系统三部分构成，其中发射系统由两个单频功率源、混频器 Mix1、带通滤波器 BPF1 和放大器 Amp1 构成，接收系统由带通滤波器 BPF2、放大器 Amp2、混频器 Mix2、带通滤波器 BPF3、放大器 Amp3、混频器 Mix3、带通滤波器 BPF4、放大器 Amp4 构成，同时原理图中添加了最大增益指示表、功率增益指示表、谐波平衡仿真控制器、S 参数仿真控制器、交流仿真控制器和仿真设置控制器。下面对上述构成元件加以说明。

#### 1. 发射系统

发射系统由单频功率源、混频器、带通滤波器和放大器构成，发射系统原理图如图 5.17 所示。

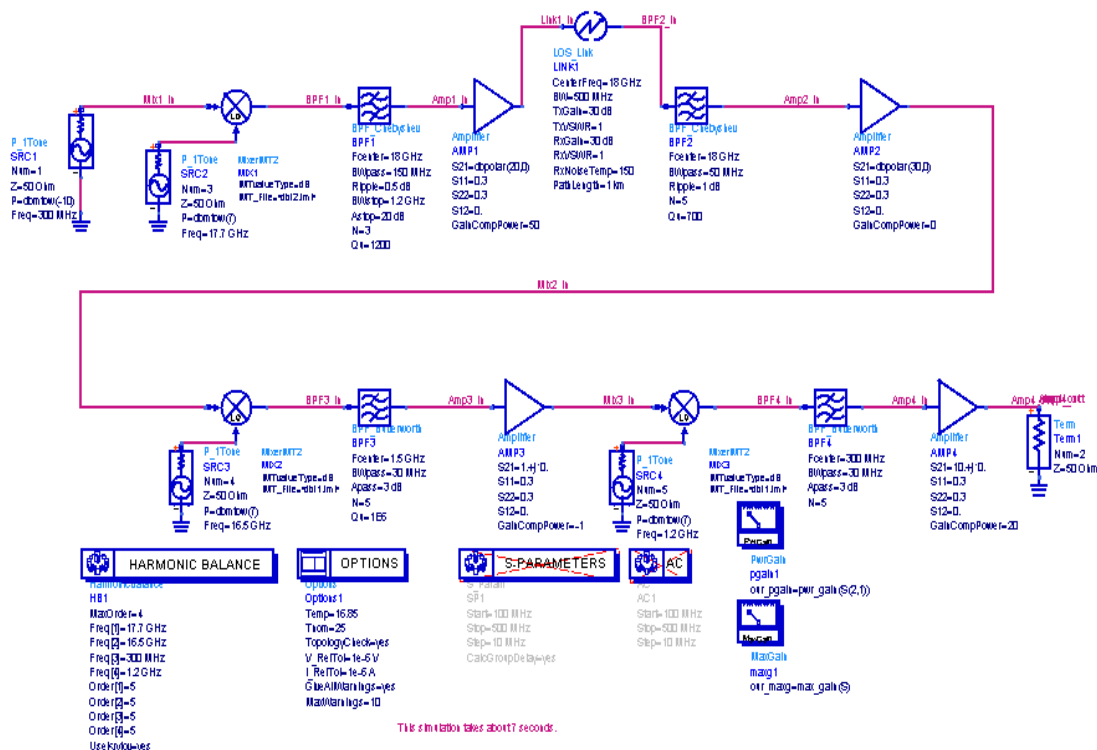


图 5.16 系统级设计与仿真原理图

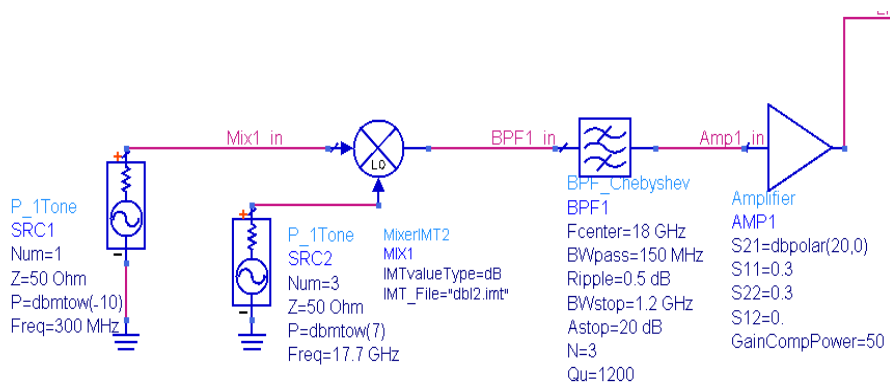


图 5.17 发射系统原理图

图 5.17 中发射系统的元件构成如下。

1) 两个单频功率源。

在原理图中, 有两个单频功率源 P\_1 Tone, 这两个源 SRC1 和 SRC2 的参数已经在原理图中显示出来, 其中 SRC1 单频功率源的设置如下。

- ① P\_1Tone, 表示频域功率源为单频源。
- ② Z=50 Ohm, 表示频域功率源的内阻为 50Ω。
- ③ P=dbmtow(-10), 表示频域功率源的输出功率为-10dBm。
- ④ Freq=300MHz, 表示频域功率源的频率为 300MHz。

另一个单频功率源 SRC2 的设置如下。

- ① P\_1Tone, 表示频域功率源为单频源。
- ② Z=50 Ohm, 表示频域功率源的内阻为 50Ω。
- ③ P=dbmtow (7), 表示频域功率源的输出功率为 7dBm。
- ④ Freq=17.7GHz, 表示频域功率源的频率为 17.7GHz。

## 2) 混频器 Mix1。

双击原理图中的混频器 Mix1, 可以查看混频器 Mix1 的设置情况, Mix1 设置的对话框如图 5.18 所示。

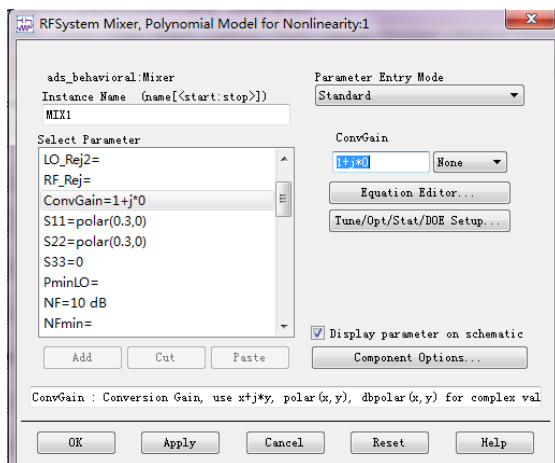


图 5.18 混频器 Mix1 的设置对话框

由图 5.18 可以看到混频器 Mix1 的设置如下。

- ① ConvGain=1+j\*0, 表示混频器的转换增益为 1+j\*0。
- ② S11=molar (0.3, 0), 表示混频器端口 1 的反射系数为 0.3。
- ③ S22= polar (0.3, 0), 表示混频器端口 2 的反射系数为 0.3。
- ④ NF=10dB, 表示混频器的噪声系数为 10dB。
- ⑤ R1=50Ω, 表示混频器端口 1 的阻抗为 50Ω。
- ⑥ R2=50Ω, 表示混频器端口 2 的阻抗为 50Ω。
- ⑦ R3=50Ω, 表示混频器端口 3 的阻抗为 50Ω。

## 3) 带通滤波器 BPF1。

带通滤波器 BPF1 的设置如下。

- ① BPF\_Chebyshev, 这是切比雪夫带通滤波器。
- ② Fcenter=18GHz, 带通滤波器的中心频率为 18GHz。
- ③ BWpass=150MHz, 带通滤波器的带宽为 150MHz。
- ④ Ripple=0.5dB, 带通滤波器通带内波纹为 0.5dB。
- ⑤ BWstop=1.2GHz, 带通滤波器的阻带频率为 1.2GHz。
- ⑥ Astop=20dB, 带通滤波器阻带衰减为 20dB。
- ⑦ N=3, 带通滤波器的阶数为 3。
- ⑧ Qu=1 200, 带通滤波器的无载品质因数为 1 200。

## 4) 放大器 Amp1。

放大器 Amp1 的设置如下。



- ① Amplifier, 这是放大器。
- ②  $S21=dbpolar(20, 0)$ , 表示放大器的增益为 20dB。
- ③  $S11=0.3$ , 表示放大器输入端口的反射系数为 0.3。
- ④  $S22=0.3$ , 表示放大器输出端口的反射系数为 0.3。
- ⑤  $S12=0$ , 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。
- ⑥  $GainCompPower=50$ , 表示放大器增益压缩点的功率为 50dBm。

## 2. 视距传输天线链接系统 LOS\_Link

视距传输天线链接系统 LOS\_Link 给出了发射天线参数、接收天线参数、视距传输距离和视距传输频率等相关参数, 这些参数的设置如下。

- ①  $CenterFreq=18GHz$ , 表示中心频率为 18GHz。
- ②  $BW=500MHz$ , 表示带宽为 500MHz。
- ③  $TxGain=30dB$ , 表示发射天线的增益为 30dB。
- ④  $TxVSWR=1$ , 表示发射天线的驻波系数为 1。
- ⑤  $RxGain=30dB$ , 表示接收天线的增益为 30dB。
- ⑥  $RxVSWR=1$ , 表示接收天线的驻波系数为 1。
- ⑦  $RxNoiseTemp=150$ , 表示接收天线的噪声温度为 150K。
- ⑧  $PathLength=1km$ , 表示视距传输距离为 1km。

## 3. 接收系统

接收系统由带通滤波器 BPF2、放大器 Amp2、混频器 Mix2、带通滤波器 BPF3、放大器 Amp3、混频器 Mix3、带通滤波器 BPF4、放大器 Amp4 构成, 接收系统通过两次混频降低频率, 每次混频前与混频后都采用带通滤波器和放大器。接收系统原理图如图 5.19 所示。

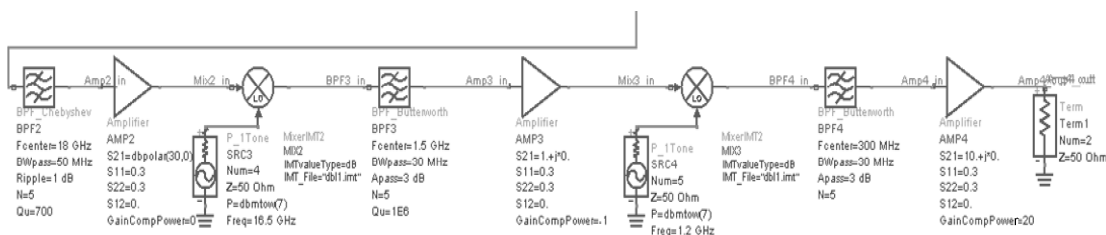


图 5.19 接收系统原理图

图 5.19 中接收系统的元件构成如下。

### (1) 带通滤波器 BPF2。

带通滤波器 BPF2 的设置如下。

- ① BPF\_Chebyshev, 这是切比雪夫带通滤波器。
- ②  $Fcenter=18GHz$ , 带通滤波器的中心频率为 18GHz。
- ③  $BWpass=50MHz$ , 带通滤波器的带宽为 50MHz。
- ④  $Ripple=1dB$ , 带通滤波器通带内波纹为 1dB。
- ⑤  $N=5$ , 带通滤波器的阶数为 5。
- ⑥  $Qu=700$ , 带通滤波器的无载品质因数为 700。

### (2) 放大器 Amp2。

放大器 Amp2 的设置如下。

- ① Amplifier, 这是放大器。
- ② S21=dbpolar (30, 0), 表示放大器的增益为 30dB。
- ③ S11=0.3, 表示放大器输入端口的反射系数为 0.3。
- ④ S22=0.3, 表示放大器输出端口的反射系数为 0.3。
- ⑤ S12=0, 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。
- ⑥ GainCompPower=0, 表示放大器增益压缩点的功率为 0dBm。

(3) 单频功率源 SRC3。

SRC3 单频功率源的设置如下。

- ① P\_1Tone, 表示频域功率源为单频源。
- ② Z=50 Ohm, 表示频域功率源的内阻为 50Ω。
- ③ P=dbmtow (7), 表示频域功率源的输出功率为 7dBm。
- ④ Freq=16.5GHz, 表示频域功率源的频率为 16.5GHz。

(4) 混频器 Mix2。

双击原理图中的混频器 Mix2, 可以查看混频器 Mix2 的设置情况, 混频器 Mix2 的设置如下。

- ① ConvGain=1+j\*0, 表示混频器的转换增益为 1+j\*0。
- ② S11=molar (0.3, 0), 表示混频器端口 1 的反射系数为 0.3。
- ③ S22=polar (0.3, 0), 表示混频器端口 2 的反射系数为 0.3。
- ④ NF=10dB, 表示混频器的噪声系数为 10dB。
- ⑤ R1=50Ω, 表示混频器端口 1 的阻抗为 50Ω。
- ⑥ R2=50Ω, 表示混频器端口 2 的阻抗为 50Ω。
- ⑦ R3=50Ω, 表示混频器端口 3 的阻抗为 50Ω。

(5) 带通滤波器 BPF3。

带通滤波器 BPF3 的设置如下。

- ① BPF\_Butterworth, 这是巴特沃兹带通滤波器。
- ② Fcenter=1.5GHz, 带通滤波器的中心频率为 1.5GHz。
- ③ BWpass=30MHz, 带通滤波器的带宽为 30MHz。
- ④ Apass=3dB, 带通滤波器通带最大衰减为 3dB。
- ⑤ N=5, 带通滤波器的阶数为 5。
- ⑥ Qu=1E6, 带通滤波器的无载品质因数为 1E6。

(6) 放大器 Amp3。

放大器 Amp3 的设置如下。

- ① Amplifier, 这是放大器。
- ② S21=1+j\*0, 表示放大器的增益为 1+j\*0。
- ③ S11=0.3, 表示放大器输入端口的反射系数为 0.3。
- ④ S22=0.3, 表示放大器输出端口的反射系数为 0.3。
- ⑤ S12=0, 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。
- ⑥ GainCompPower=-1, 表示放大器增益压缩点的功率为 -1dBm。

(7) 单频功率源 SRC4。

- ① SRC4 单频功率源的设置如下。

- ② P\_1Tone, 表示频域功率源为单频源。
- ③ Z=50 Ohm, 表示频域功率源的内阻为 50Ω。
- ④ P=dbmtow (7), 表示频域功率源的输出功率为 7dBm。
- ⑤ Freq=1.2GHz, 表示频域功率源的频率为 1.2GHz。
- (8) 混频器 Mix3。

双击原理图中的混频器 Mix3, 可以查看混频器 Mix3 的设置情况, 混频器 Mix3 的设置如下。

- ① ConvGain=1+j\*0, 表示混频器的转换增益为 1+j\*0。
- ② S11=polar (0.3, 0), 表示混频器端口 1 的反射系数为 0.3。
- ③ S22=polar (0.3, 0), 表示混频器端口 2 的反射系数为 0.3。
- ④ NF=10dB, 表示混频器的噪声系数为 10dB。
- ⑤ R1=50Ω, 表示混频器端口 1 的阻抗为 50Ω。
- ⑥ R2=50Ω, 表示混频器端口 2 的阻抗为 50Ω。
- ⑦ R3=50Ω, 表示混频器端口 3 的阻抗为 50Ω。
- (9) 带通滤波器 BPF4。

带通滤波器 BPF4 的设置如下。

- ① BPF\_Butterworth, 这是巴特沃兹带通滤波器。
- ② Fcenter=300MHz, 带通滤波器的中心频率为 300MHz。
- ③ BWpass=30MHz, 带通滤波器的带宽为 30MHz。
- ④ Apass=3dB, 带通滤波器通带最大衰减为 3dB。
- ⑤ N=5, 带通滤波器的阶数为 5。

- (10) 放大器 Amp4。

放大器 Amp4 的设置如下。

- ① Amplifier, 这是放大器。
- ② S21=10+j\*0, 表示放大器的增益为 10+j\*0。
- ③ S11=0.3, 表示放大器输入端口的反射系数为 0.3。
- ④ S22=0.3, 表示放大器输出端口的反射系数为 0.3。
- ⑤ S12=0, 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。
- ⑥ GainCompPower=20, 表示放大器增益压缩点的功率为 20dBm。

#### 4. 各种指示仪器和各种仿真控制器

原理图中添加了最大增益指示表、功率增益指示表、谐波平衡仿真控制器、S 参数仿真控制器、交流仿真控制器和仿真设置控制器, 这些元件如图 5.20 所示。

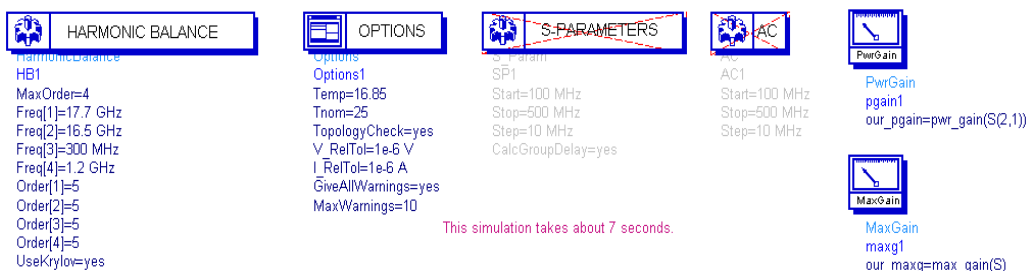


图 5.20 原理图中各种指示仪器和各种仿真控制器

图 5.20 中各种指示仪器和各种仿真控制器的元件构成如下。

(1) 最大增益指示表和功率增益指示表。

最大增益指示表和功率增益指示表可以在 S 参数仿真元件面板中添加。

(2) 谐波平衡仿真控制器。

谐波平衡仿真控制器的设置如下。

- ① MaxOrder=4, 表示谐波平衡仿真时最大混合阶数为 4。
- ② Freq[1]=17.7GHz, 表示谐波平衡仿真的第一个基准频率为 17.7GHz。
- ③ Freq[2]=16.5GHz, 表示谐波平衡仿真的第二个基准频率为 16.5GHz。
- ④ Freq[3]=300MHz, 表示谐波平衡仿真的第三个基准频率为 300MHz。
- ⑤ Freq[4]=1.2GHz, 表示谐波平衡仿真的第四个基准频率为 1.2GHz。
- ⑥ Order[1]=5, 表示谐波平衡仿真时第一个基波频率的最大谐波次数为 5。
- ⑦ Order[2]=5, 表示谐波平衡仿真时第二个基波频率的最大谐波次数为 5。
- ⑧ Order[3]=5, 表示谐波平衡仿真时第三个基波频率的最大谐波次数为 5。
- ⑨ Order[4]=5, 表示谐波平衡仿真时第四个基波频率的最大谐波次数为 5。

(3) 仿真设置控制器。


- ① Temp=16.85, 表示仿真时温度设置为 16.85℃。
- ② Tnom=25, 表示模型温度设置为 25℃。
- ③ TopologyCheck=yes, 表示仿真时设置拓扑检查。
- ④ V\_Re1Tol=1e-6V, 表示电压值的误差为 1e-6V。
- ⑤ I\_Re1Tol=1e-6A, 表示电流值的误差为 1e-6A。

## 5.2.2 仿真结果分析

有两种方法查看仿真结果：一种是运行仿真后查看仿真结果，另一种是在数据显示视窗中直接查看。下面用两种方法查看仿真结果。

### 1. 运行仿真后查看仿真结果

在 RF\_SYS1.dsn 原理图中, 运行仿真并查看仿真结果的步骤如下。

- (1) 在原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。
- (2) 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 仿真结果显示的方式是设定好的, 数据显示视窗会自动显示仿真结果, 如图 5.21 所示。
- (3) 图 5.21 给出了频谱分布。

### 2. 在数据显示视窗中直接查看仿真结果

还有另外一种查看仿真结果的方法。例程中的仿真结果已经被保存在软件中, 可以直接查看, 查看的步骤如下。

- (1) 在 RF\_SYS1.dsn 原理图视窗中, 选择【Window】→【Open Data Display】命令, 弹出【Open Data Display】对话框。
- (2) 在【Open Data Display】对话框中, 单击【RF\_SYS1\_spectra.dds】项, 选择查看 RF\_SYS1.dsn 原理图的仿真结果, 然后单击【打开】按钮, 关闭对话框。
- (3) 当【Open Data Display】对话框关闭后, 如图 5.21 所示的仿真结果会自动弹出。

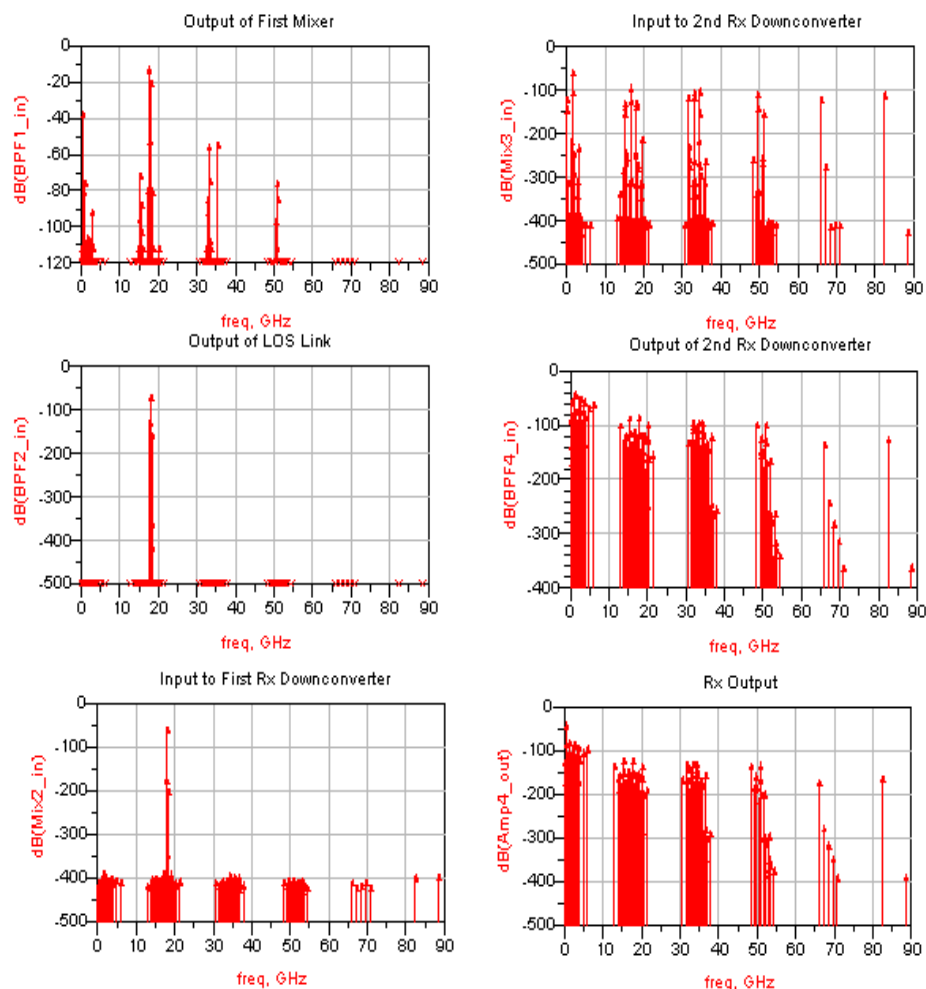


图 5.21 系统级例程仿真结果显示

## 习题

1. ADS 既可以提供电路的设计与仿真，又可以提供系统级设计与仿真。二者有何联系与区别？
2. 将各个电路级功能模块连接成系统，进行 ADS 综合仿真时，需要注意哪些问题？
3. 对通信系统进行 ADS 仿真的实例中，各个电路级功能模块的相关参数设置是否合理？若参数设置不合理将对仿真结果影响很大。查阅相关资料，进一步了解和设置参数的理论依据。

## 第6章 ADS 基础实验

### 6.1 匹配电路

在射频电路设计中，匹配电路设计对于整个系统的性能的好坏来说十分重要。ADS 软件中带有设计向导，为此提供了设计匹配电路的多种方法，本节将利用设计向导来设计匹配电路，使读者对匹配电路的设计过程有一个总体的认识。

#### 6.1.1 设计向导实现匹配电路

##### 1. 项目设计的指标

本设计指标如下。

- (1) 设计单支节匹配网络。
- (2) 中心频率为 2GHz。
- (3) 负载阻抗为  $(38.5-j41.5) \Omega$ 。
- (4) 支节的特性阻抗为  $50\Omega$ 。
- (5) 传输线的特性阻抗为  $50\Omega$ 。
- (6) 要求负载与  $50\Omega$  的传输线相匹配。
- (7) 微带线基板的厚度为 1mm，相对介电常数为 5.3。

##### 2. 利用设计向导设计单支节匹配电路

设计过程如下。

- (1) 新建原理图的名称为 Matching\_21。

(2) 在微带线元器件面板【TLines-Microstrip】上，选择 MSUB 插入到原理图的画图区，在画图区中双击【MSub】项，弹出【Microstrip Substrate】设置对话框，在这个对话框中，对微带线的参数设置如下。

- ①  $H=1\text{mm}$ ，表示微带线基板的厚度为 1mm。
- ②  $\text{Er}=5.3$ ，表示微带线基板的相对介电常数为 5.3。
- ③  $\text{Mur}=1$ ，表示微带线的相对磁导率为 1。
- ④  $\text{Cond}=5.8\text{E}+7$ ，表示微带线导体的电导率为  $5.8\text{E}+7$ 。
- ⑤  $\text{Hu}=1.0\text{e}+033\text{mm}$ ，表示微带线的封装高度为  $1.0\text{e}+033\text{mm}$ 。
- ⑥  $T=0.02\text{mm}$ ，表示微带线的导体厚度层为 0.02mm。
- ⑦  $\text{TanD}=0.003$ ，表示微带线的损耗角正切为 0.003。
- ⑧  $\text{Rough}=0\text{mm}$ ，表示微带线表面粗糙度为 0mm。

完成设置的微带线 MSUB 控件如图 6.1 所示。

(3) 在原理图的元器件面板列表上，选择无源匹配网络设计向导【Passive Circuit DG - Microstrip Circuits】，元器件面板上出现与无源匹配网络设计向导对应的元器件图标。

(4) 在无源匹配网络设计元器件面板上, 选择单支节匹配网络 SSMtch 插入到原理图画图区, 对单支节匹配网络 SSMtch 设置如下。

- ① Subst=“MSub1”表示单支节匹配网络采用微带线 MSUB1 控件。
- ② F=2 GHz, 表示单支节匹配网络选取的中心频率为 2 GHz。
- ③ Zin=50 Ohm, 表示匹配的目标为输入阻抗达到 50Ω。
- ④ Zload=(38.5-j\*41.5) Ohm, 表示负载阻抗。
- ⑤ Zstub=50 Ohm, 表示支节的特性阻抗为 50Ω。
- ⑥ Zline=50 Ohm, 表示传输线的特性阻抗为 50Ω。

完成设置的单支节匹配网络 SSMtch 如图 6.2 所示。



图 6.1 微带线参数设置



图 6.2 单支节匹配网络

(5) 单击原理图中的单支节匹配网络 SSMtch, 然后单击菜单栏中的设计向导【Design Guide】菜单, 在弹出的【Passive Circuit】对话框中选择【Microstrip Control Window】项。

(6) 单击【OK】按钮, 关闭【Passive Circuit】对话框, 同时弹出设计向导【Passive Circuit Design Guide】窗口, 如图 6.3 所示。

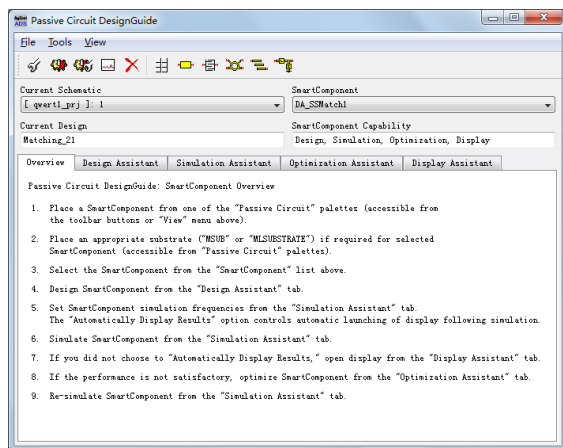




图 6.3 【Passive Circuit Design Guide】窗口

(7) 选择设计向导【Passive Circuit Design Guide】窗口中的【Design Assistant】选项卡, 然后单击【Design】按钮, 软件将自动完成单支节匹配网络的设计过程。

(8) 完成单支节匹配网络的设计过程后, 在原理图中的单支节匹配网络 SSMtch 就有了子电路, 下面观察子电路, 其步骤如下。

- ① 单击原理图中的单支节匹配网络 SSMtch 元器件。
- ② 然后单击原理图工具栏中的  按钮, 进入单支节匹配网络 SSMtch 的子电路, 子电路如图 6.4 所示。

(9) 若要退出单支节匹配网络子电路，在原理图工具栏中单击按钮即可。

3. 在原理图中仿真匹配网络

下面将由上述内容搭建原理图电路，其基本步骤如下。

(1) 选择原理图菜单栏中【Window】→【New Data Display】命令，弹出数据显示视窗。

(2) 在数据显示视窗的数据显示方式面板上，选择方程【Eqn】按钮，插入到原理图中。

这时会弹出【Enter Equation】对话框，在对话框中输入方程“ $C=1000/(2*2*\pi*41.5)$ ”，如图 6.5 所示。

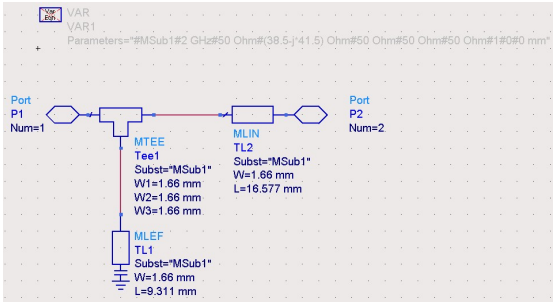


图 6.4 单支节匹配网络子电路

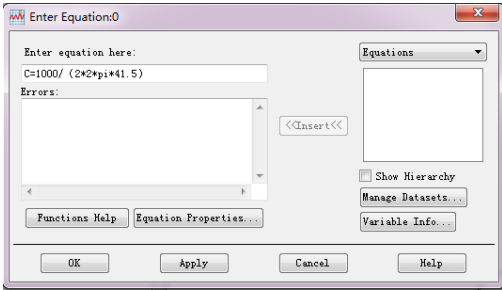



图 6.5 【Enter Equation】对话框

(3) 在数据显示视窗计算电容的方程式如图 6.6 所示。

(4) 在数据显示视窗显示方式面板上，选择数据列表显示方式按钮，可查看电容 C 的计算结果。如图 6.7 所示，电容 C 值为 1.918pF。

(5) 在原理图的元件面板列表上，选择集总参数元件【Lumped-Components】项，在集总参数元件面板上，选择电阻 R 和电容 C，插入原理图中。电阻和电容的值设置如下。


- ①  $R=38.5\Omega$ 。
- ②  $C=1.918\text{pF}$ 。

Eqn C=1000/(2\*2\*pi\*41.5)

图 6.6 计算电容的方程式

C	
	1.918

图 6.7 电容 C 值数据列表显示

(6) 单击工具栏中的按钮，将电阻 R 和电容 C 连接起来，并将电容 C 接地，构成负载电路。

(7) 在集总参数元件面板上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上，选择负载终端 Term，插入原理图中，定义负载终端 Term1 为输入端口。

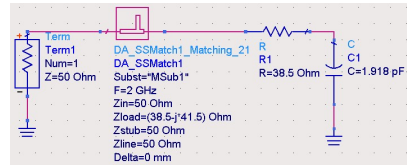




图 6.8 带有匹配电路的原理图

(8) 在原理图工具栏中单击按钮，将地线 (Ground) 插入原理图，让负载终端 Term1 接地。

(9) 单击工具栏中的按钮，将原理图中的负载终端 Terms1、匹配电路和负载电路连接起来，连接方式如图 6.8 所示。

(10) 在如图 6.8 所示的原理图中，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板




上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控制器 SP, 插入原理图中, 表明将要做 S 参数仿真。

(11) 双击原理图中的 S 参数仿真控制器, 打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框, 对【Frequency】项进行参数设置, 如图 6.9 所示。参数设置如下。

- ① 扫描的起始值设为 1GHz。
- ② 扫描的终止值设为 3GHz。
- ③ 扫描的间隔设为 0.1GHz。
- ④ 其余参数保持默认。

(12) 对原理图执行 S 参数仿真。

- ① 单击  按钮运行仿真。
- ② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入 S11 的矩形图, 显示 S21 的仿真结果。矩形图参数设置如图 6.10 所示。

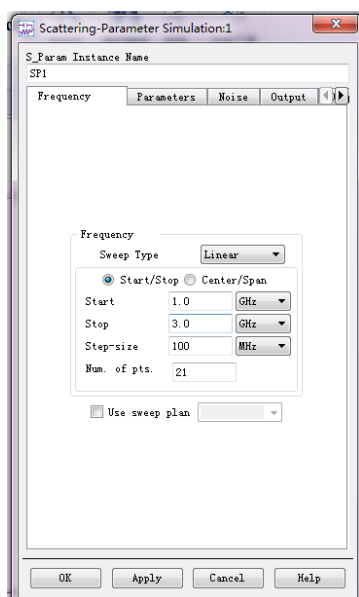


图 6.9 【Frequency】项参数设置

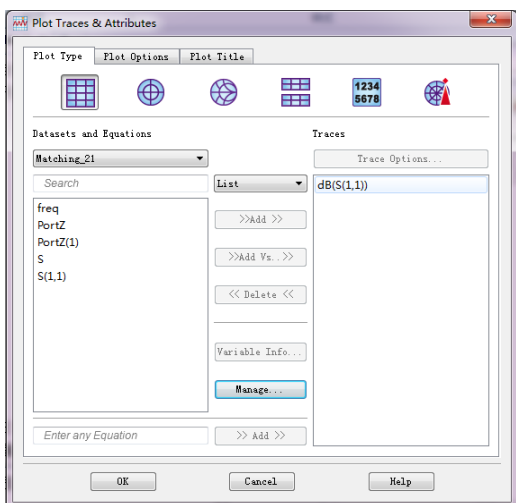


图 6.10 矩形图参数设置

③ 在 S11 曲线的中心频率 2GHz 处, 插入一个标记 marker, 可以显示 2GHz 处的增益。

数据显示视窗如图 6.11 所示。

(13) 由图 6.11 可以看出, S11 曲线在中心频率处的值为 -29.787dB, 表明了输入端匹配良好。

### 6.1.2 Smith 图实现匹配电路

在射频电路设计中, Smith 图是一个重要的工具, 而在匹配电路设计中, Smith 图尤其显得重要。在 ADS 软件自带的工具中, 含有 Smith 图, 本节将给出 Smith 图的使用方法, 并利用 Smith 图设计网络匹配电路。

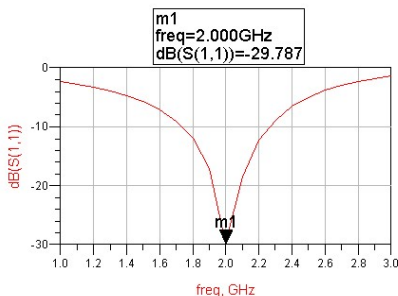


图 6.11 S11 曲线

## 1. Smith 图的使用

### 1) 创建项目

使用主视窗创建一个匹配网络项目，项目命名为 `Impedance_Matching`，本节所有的设计都将保存在这个项目之中。创建项目的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。

(2) 选择主视窗中的【File】→【New Workspace】命令，会弹出【New Workspace】对话框，在【New Workspace】对话框中，将“项目名称”设为 `Impedance_Matching`。

(3) 单击【Finish】按钮，完成创建项目。

### 2) 创建原理图

选择主视窗中的【File】→【New Schematic】命令，弹出【New Schematic】对话框，在【New Schematic】对话框中做如下设置。

(1) 输入新建原理图的名称为 `Smith Chart`。

(2) 选择 Schematic Design Templates 为 `none`。

(3) 单击【OK】按钮，完成创建原理图的工作。

### 3) ADS 软件中的史密斯圆图

在原理图上，选择【Tools】→【Smith Chart】命令，弹出【Smith Chart Utility】窗口，如图 6.12 所示。

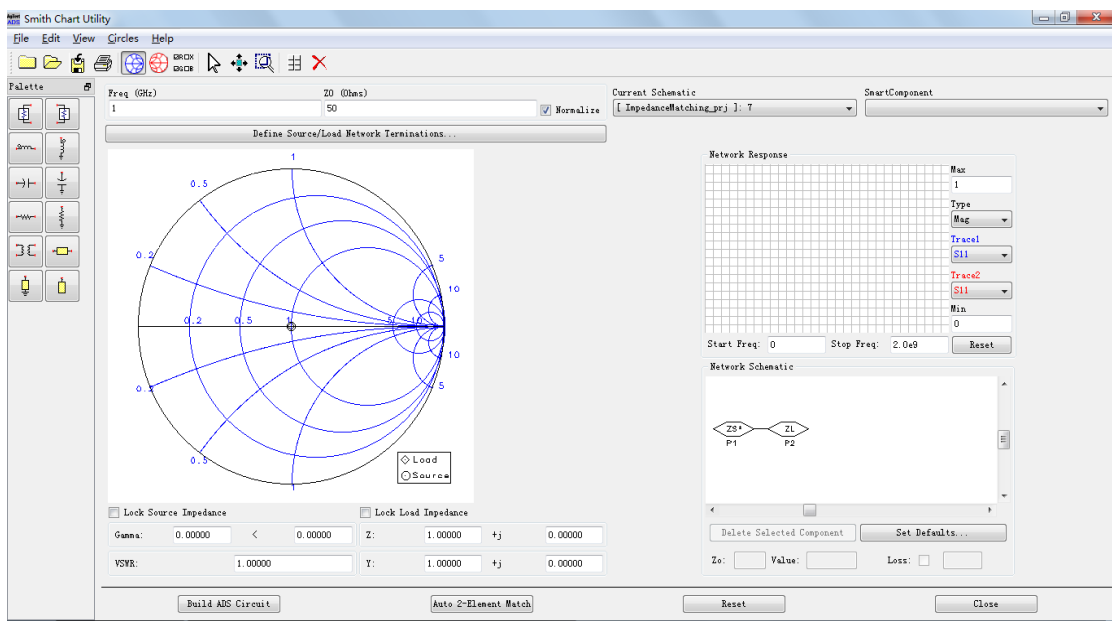


图 6.12 【Smith Chart Utility】窗口初始状态

下面对该窗口的内容加以说明。

(1) Smith 图使用区，如图 6.13 所示。

Smith 图有以下用途。

- ① 可将传输线上的一点标明在原图上。
- ② 可将原阻抗和负载阻抗标明在原图上。

- ③ 可将串联或并联集总元器件的轨迹标明在原图上。
- ④ 可将串联或并联一段传输线的轨迹标明在原图上。

(2) 匹配元器件选择面板, 如图 6.14 所示。

匹配元器件选择面板有以下用途。

- ① 可选择串联或并联电容。
- ② 可选择串联或并联电感。
- ③ 可选择串联或并联电阻, 这种方式不常使用。
- ④ 可选择阻抗变换或串联输入线。
- ⑤ 可选择并联开路支节或短路支节。

(3) 工作状态设置区, 如图 6.15 所示。

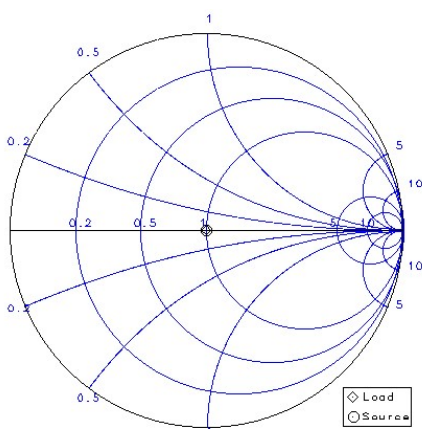


图 6.13 Smith 图使用区

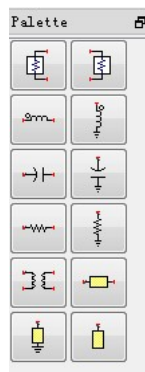


图 6.14 匹配元器件选择面板



图 6.15 工作状态设置区

工作状态设置区有以下用途。

- ① 可设置频率和系统阻抗。
- ② 可设置源和负载阻抗。
- ③ 可显示当前圆图所在的原理图名称。
- (4) 工作参数显示区, 如图 6.16 所示。

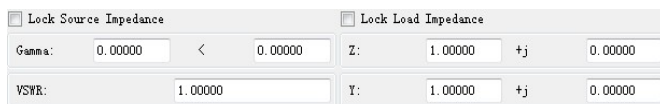


图 6.16 工作参数显示区

工作参数区有以下用途。

- ① 可显示反射系数  $\Gamma$ 。
- ② 可显示输入阻抗  $Z$ 。

- ③ 可显示输入导纳  $Y$ 。
  - ④ 可显示驻波比  $VSWR$ 。
  - (5) 网络响应显示区, 如图 6.17 所示。
- 网络响应显示区有以下用途。
- ① 横轴显示的是频率范围。
  - ② 纵轴需要显示的参量和参量显示方式可自定。
  - ③ 画图区显示匹配网络的响应。
- (6) 匹配电路显示区, 如图 6.18 所示。

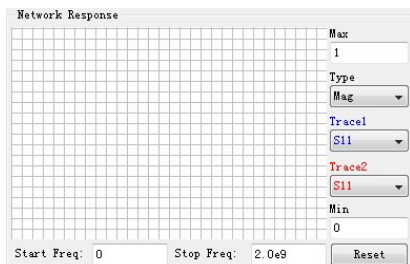


图 6.17 网络响应显示区

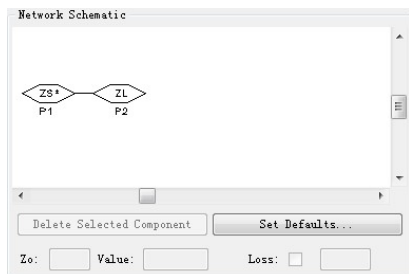


图 6.18 匹配电路显示区

匹配电路显示区有以下用途。

- ① 显示匹配网络的电路构成。
  - ② 显示匹配网络的元器件数值。
- (7) 匹配电路自动建立区, 如图 6.19 所示。

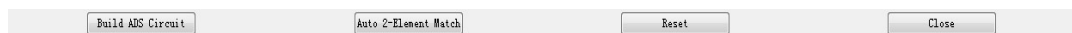


图 6.19 匹配电路自动建立区

匹配电路自动建立区有以下用途。

- ① 自动建立匹配电路的子电路。
- ② 选择二元器件匹配电路方式。

## 2. 利用 Smith 图仿真 L 型匹配网络

### 1) 项目设计的指标

本设计指标如下。

- (1) 设计集总参数 L 型匹配网络。
- (2) 中心频率为 1GHz。
- (3) 负载由  $10\Omega$  的电阻和  $1.6\text{nH}$  的电感串联而成。
- (4) 要求负载与  $50\Omega$  的传输线相匹配。

### 2) 利用史密斯圆图设计 L 型匹配网络

设计过程如下。

- (1) 新建原理图的名称为 Matching\_11。

- (2) 在原理图上, 选择【Tools】→【Smith Chart】命令, 弹出【Smith Chart Utility】窗口。

- (3) 在【Smith Chart Utility】窗口中, 工作状态设置区有频率和阻抗值输入框, 如图 6.20 所示。在输入框中, 参数设置如下。

- ① 频率输入 1GHz。
- ② 阻抗输入 50Ω。

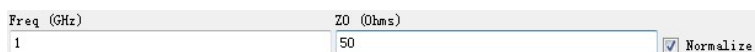


图 6.20 频率和系统阻抗参数设置

(4) 在【Smith Chart Utility】窗口中，单击【Define Source/Load Network Terminations】按钮，弹出【Network Terminations】对话框，如图 6.21 所示。

在【Network Terminations】对话框中，参数设置如下。

- ① 选中【Enable Source Termination】复选框。
- ② 选中【Enable Load Termination】复选框。
- ③ 在【Load Impedance】项中，选择 Series RL、R=10Ω 和 L=1.6nH。
- ④ 其他选项保持默认。

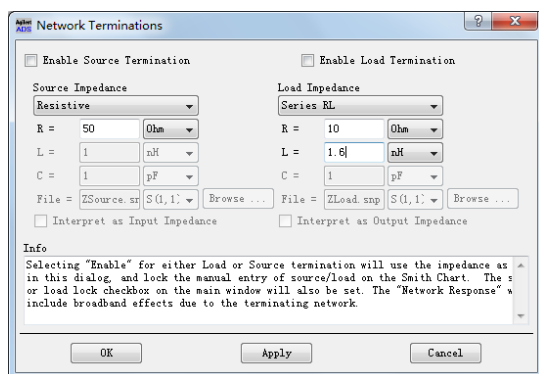


图 6.21 【Network Terminations】对话框

(5) 在原理图 Matching\_11 中，选中【Smith Chart Matching】元器件面板，将史密斯圆图这个元器件插入到原理图中。

(6) 接下来设计匹配网络，其步骤如下。

- ① 选中原理图中的史密斯圆图元器件。
- ② 单击【Smith Chart Utility】窗口中的【Build ADS Circuit】按钮。
- ③ 单击【Smith Chart Utility】窗口中的【Auto 2-Element Match】按钮，这时弹出【Network Selector】对话框，如图 6.22 所示。
- ④ 选中【Network Selector】对话框中的“串联电容、并联电感”图标，关闭该对话框。
- ⑤ 同时【Smith Chart Utility】窗口中出现匹配电路，如图 6.23 所示。

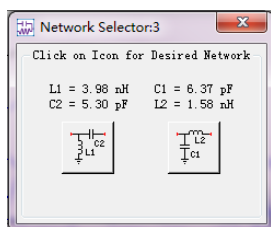


图 6.22 【Network Selector】对话框

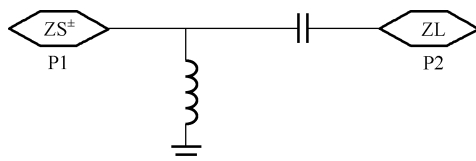


图 6.23 匹配电路图

(7) 单击图 6.23 中的电容, 可查看电容值, 如图 6.24 所示。

(8) 【Smith Chart Utility】窗口中的史密斯圆图, 如图 6.25 所示。

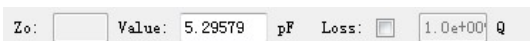


图 6.24 电容值显示

(9) 【Smith Chart Utility】窗口中的网络匹配响应, 如图 6.26 所示。

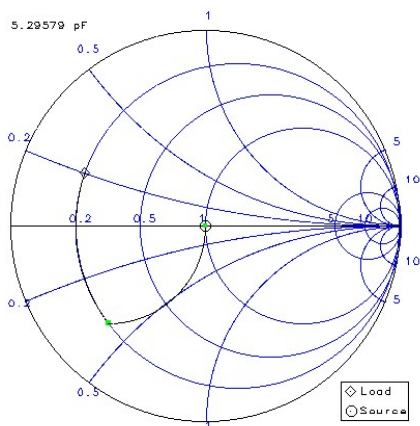


图 6.25 史密斯圆图

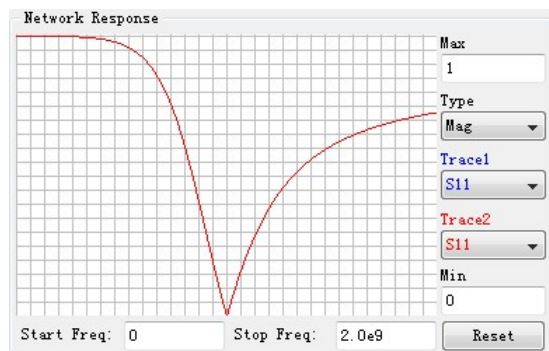



图 6.26 网络匹配响应显示


### 3) 在原理图中仿真匹配网络

(1) 现在原理图中 Smith 图元器件就有了子电路, 下面观察子电路, 其步骤如下。

① 单击原理图中 Smith 图元器件。

② 然后单击原理图工具栏中的  按钮, 进入 Smith 图元器件的子电路, 子电路如图 6.27 所示。


③ 如图 6.27 所示, 匹配网络由  $C=5.30\text{pF}$  的电容和  $L=3.98\text{nH}$  的电感构成。

(2) 若要退出史密斯圆图元器件子电路, 在原理图工具栏中单击  按钮即可。

(3) 在原理图的元件面板列表上, 选择集总参数元件【Lumped-Components】项, 在集总参数元件面板上, 选择电阻 R 和电感 L, 插入原理图中。电阻和电感的值设置如下。


①  $R=10\Omega$ 。

②  $L=1.6\text{nH}$ 。

(4) 单击工具栏中的  按钮, 将电阻 R 和电感 L 连接起来, 并将电感 L 接地, 构成负载电路。

(5) 在集总参数元件面板上, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上, 选择负载终端 Term, 插入原理图中, 定义负载终端 Term 1 为输入端口。

(6) 在原理图工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 插入原理图, 让负载终端 Term 1 接地。

(7) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的负载终端 Terms 1、匹配电路和负载电路连接起来, 连接方式如图 6.28 所示。

(8) 在如图 6.28 所示的原理图中, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控制器 SP, 插入原理图中, 表明将要做 S 参数仿真。

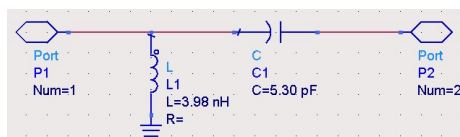


图 6.27 Smith 图元器件的子电路

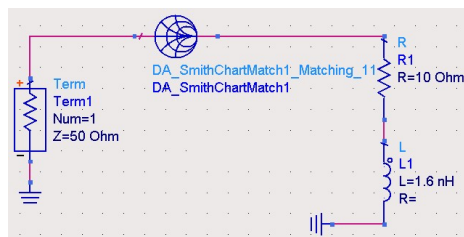


图 6.28 带有匹配电路的原理图

(9) 双击原理图中的 S 参数仿真控制器，打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框，在对话框中对【Frequency】项进行参数设置，如图 6.29 所示。参数设置如下。

- ① 扫描的起始值设为 0.5GHz。
- ② 扫描的终止值设为 1.5GHz。
- ③ 扫描的间隔设为 100MHz。
- ④ 其余参数保持默认。

(10) 对原理图执行 S 参数仿真。

- ① 单击 按钮运行仿真。
- ② 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入 S11 的矩形图，显示 S21 的仿真结果。矩形图参数设置，如图 6.30 所示。

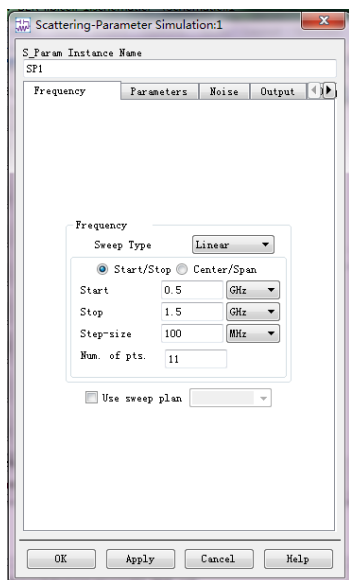


图 6.29 【Frequency】项参数设置

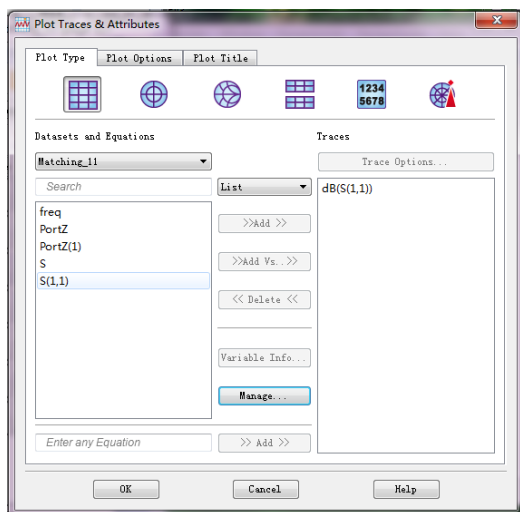


图 6.30 矩形图参数设置

- ③ 在 S11 曲线的中心频率 1GHz 处，插入一个标记 marker，可以显示 1GHz 处的增益。数据显示视窗如图 6.31 所示。

(11) 由图 6.31 可以看出，S11 曲线在中心频率处的值为-57.194dB，表明了输入端匹配良好。

### 3. 利用 Smith 图仿真 T 型匹配网络

#### 1) 项目设计的指标

本设计指标如下。



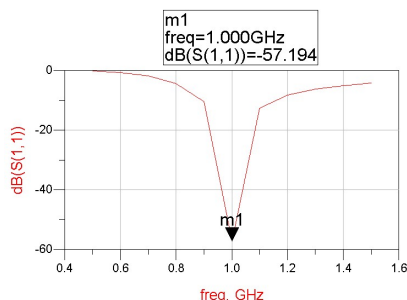


图 6.31 S11 曲线

- ① 设计集总参数 T 型匹配网络。
- ② 中心频率为 1GHz。
- ③ 负载由  $80\Omega$  的电阻和  $2.65\text{pF}$  的电容串联而成。
- ④ 要求负载与  $50\Omega$  的传输线相匹配。

2) 利用史密斯圆图设计 T 型匹配网络设计过程如下。

- (1) 新建原理图的名称为 Matching\_12。
- (2) 在原理图上, 选择【Tools】→【Smith Chart】→命令, 弹出【Smith Chart Utility】窗口。

(3) 在【Smith Chart Utility】窗口中, 工作状态设置区有频率和阻抗值输入框, 如图 6.32 所示。在输入框中, 参数设置如下。

- ① 频率输入 1GHz。
- ② 阻抗输入  $50\Omega$ 。

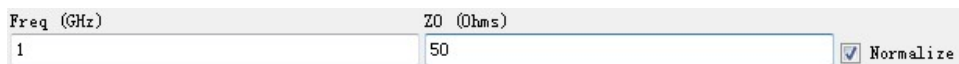


图 6.32 频率和系统阻抗参数设置

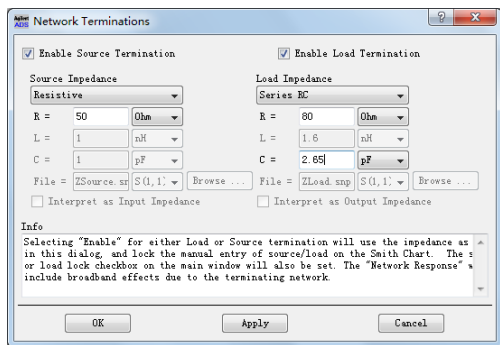


图 6.33 【Network Terminations】对话框

(4) 在【Smith Chart Utility】窗口中, 单击【Define Source/Load Network Terminations】按钮, 弹出【Network Terminations】对话框, 如图 6.33 所示。

在【Network Terminations】对话框中, 参数设置如下。

- ① 选中【Enable Source Termination】复选框。
- ② 选中【Enable Load Termination】复选框。
- ③ 在【Load Impedance】项中, 选择 Series RC、 $R=80\Omega$  和  $C=2.65\text{pF}$ 。

④ 其他选项保持默认。

(5) 接下来设计匹配网络, 其步骤如下。

- ① 在匹配元器件选择面板上, 单击串联电感【Series Inductor】按钮, 然后向上移动鼠标。
- ② 在匹配元器件选择面板上, 单击并联电感【Shunt Inductor】按钮, 然后向上移动鼠标。
- ③ 在匹配元器件选择面板上, 单击串联电容【Series Capacitor】按钮, 然后向下移动鼠标。由于是三元器件匹配, 三元器件取值有多样性, 这里只要求光标最后回到坐标原点。这时的 Smith 图如图 6.34 所示。

(6) 三元器件 T 型网络匹配的电路图如图 6.35 所示。

(7) 单击图 6.35 中的电容和电感, 可分别查看电容值和电感值, 电容和电感值如下。

- ① 串联电容  $C=1.717\ 85\text{pF}$ 。
- ② 串联电感  $L=26.492\ 48\text{nH}$ 。
- ③ 并联电感  $L=67.439\ 03\text{nH}$ 。

(8) 【Smith Chart Utility】窗口中的网络匹配响应, 如图 6.36 所示。



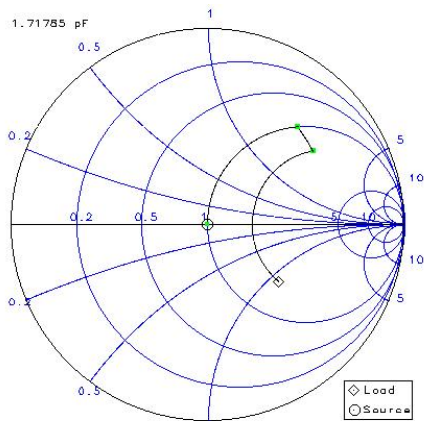


图 6.34 三元器件匹配的 Smith 图

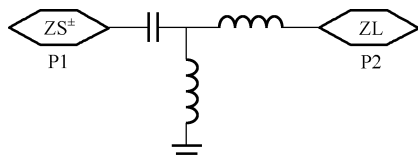


图 6.35 三元器件 T 型网络匹配的电路图

### 3) 在原理图中仿真匹配网络

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择集总参数元件【Lumped-Components】项, 在集总参数元件面板上, 选择电阻 R 和电容 C, 插入原理图中。电阻和电容的值设置如下。

①  $R=80\Omega$ 。

②  $C=2.65\text{pF}$ 。

(2) 单击工具栏中的 按钮, 将电阻 R 和电容 C 连接起来, 并将电容 C 接地, 构成负载电路。

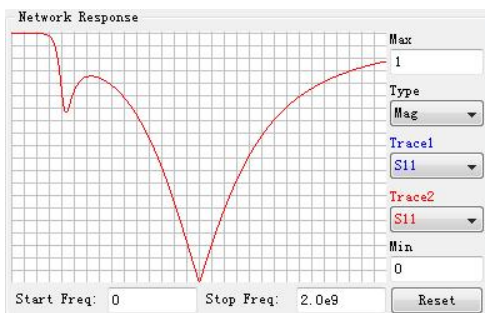


图 6.36 网络匹配响应显示

(3) 选择集总参数元件【Lumped-Components】项, 在集总参数元件面板上, 选择两个电感 L 和一个电容 C, 插入原理图中。电感和电容的值设置如下。

① 串联电容  $C=1.72\text{pF}$ 。

② 串联电感  $L=26.50\text{nH}$ 。

③ 并联电感  $L=67.44\text{nH}$ 。

(4) 单击工具栏中的 按钮, 将两个电感 L 和一个电容 C 连接起来, 并将 1 个电感 L 接地, 构成匹配电路。

(5) 在集总参数元件面板上, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上, 选择负载终端 Term, 插入原理图中, 定义负载终端 Term 1 为输入端口。

(6) 在原理图工具栏中单击 按钮, 将地线 (Ground) 插入原理图, 让负载终端 Term 1 接地。

(7) 单击工具栏中的 按钮, 将原理图中的负载终端 Terms 1、匹配电路和负载电路连接起来, 连接方式如图 6.37 所示。

(8) 在如图 6.37 所示的原理图中, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控制器 SP, 插入原理图中, 表明将要做 S 参数仿真。

(9) 双击原理图中的 S 参数仿真控制器, 打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框, 如图 6.38 所示。在对话框中对【Frequency】项进行参数设置, 参数设置如下。

- ① 扫描的起始值设为 0.2GHz。
- ② 扫描的终止值设为 1.8GHz。
- ③ 扫描的间隔设为 100MHz。
- ④ 其余参数保持默认。

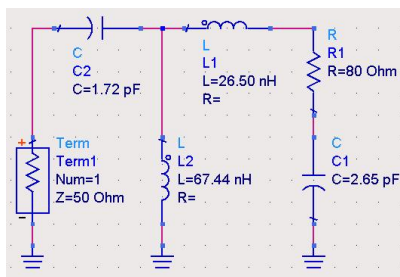


图 6.37 带有匹配电路的原理图

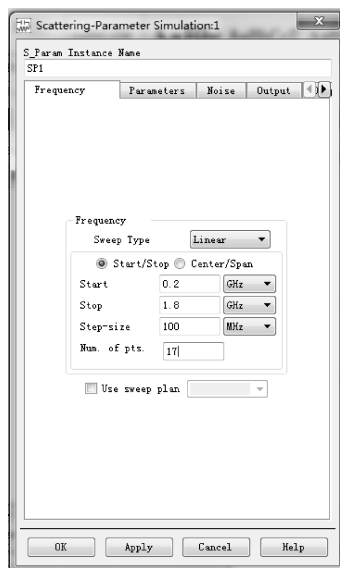


图 6.38 【Frequency】项参数设置

(12) 对原理图执行 S 参数仿真。

- ① 单击 按钮运行仿真。
- ② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入 S11 的矩形图, 显示 S21 的仿真结果。矩形图参数设置如图 6.39 所示。
- ③ 在 S11 曲线的中心频率 1GHz 处, 插入一个标记 marker, 可以显示 1GHz 处的增益。数据显示视窗如图 6.40 所示。

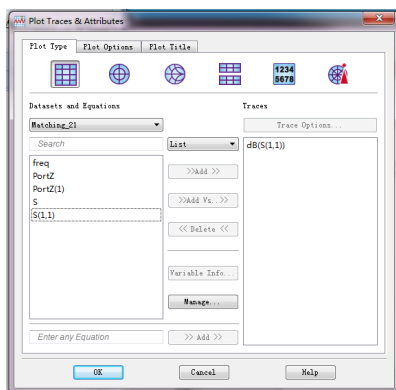


图 6.39 矩形图参数设置

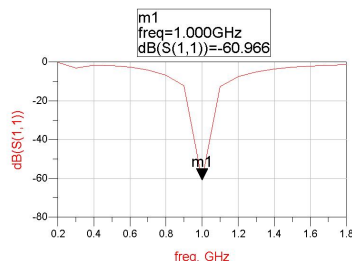


图 6.40 S11 曲线

由图 6.40 可以看出, S11 曲线在中心频率处的值为  $-60.966\text{dB}$ , 表明了输入端匹配良好。

## 6.2 衰 减 器

### 6.2.1 衰减器基本原理

衰减器通常接在信号源与负载之间, 用于衰减信号源的电压, 以防止负载电路过载, 也

可以用来完成电路系统的阻抗匹配等。衰减量通常用分贝表示。衰减器分为无源衰减器和有源衰减器。其中，无源衰减器由纯电阻构成，根据电阻的排列形式又分为“T”形、“ $\pi$ ”形和桥式“T”形衰减器等，如图 6.41 所示；有源衰减器又有宽带有源衰减器和窄带有源衰减器之分。由于无源衰减器结构较简单，本章只给出有源衰减器的 ADS 仿真实例。

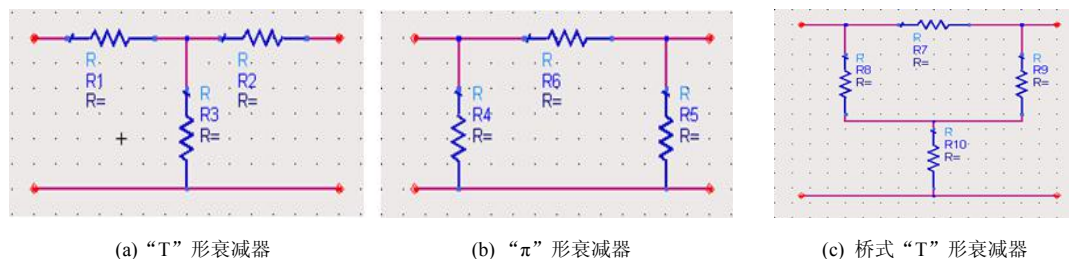


图 6.41 各种无源衰减器的基本结构

## 6.2.2 设计实现有源衰减器

桥式“T”形无源衰减器增加偏置电路就可以构成有源桥式“T”形衰减器。完整的有源桥式“T”形衰减器的结构如图 6.42 所示。二极管 VD1 和 VD2 轮流导通，当 VD1 导通、VD2 截止时，电路呈现较低的插入损耗，即低衰减状态；相反，当 VD1 截止、VD2 导通时，电路呈现较高的插入损耗，即高衰减状态。这样，就可以通过调节两个二极管上的偏压实现调节电路衰减量的功能。

本节将给出一个衰减量可调的有源衰减器的 ADS 仿真实例，具体指标要求如下：

- 工作频带为 1~2GHz。
- 低衰减时频带内的衰减小于 1.1dB，且 1.4GHz 处的衰减小于 0.8dB。
- 高衰减时频带内的衰减大于 10dB，且 1.4GHz 处的衰减大于 12dB。

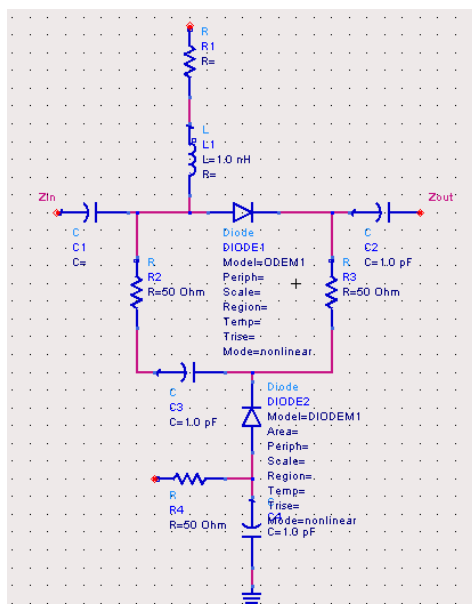


图 6.42 有源桥式“T”形衰减器原理图

- (1) 执行【File】→【New Workspace】命令，新建“attenuator”工程。
- (2) 新建原理图，从“Lumped-Components”元件库中选择电感、电容、电阻添加到原理图中，各元件的值设置和连接如图 6.43 所示。

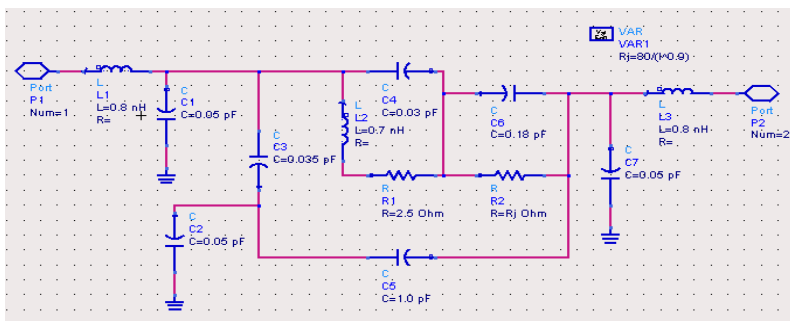


图 6.43 PIN 二极管模型

- (3) 添加一个 VAR 控件，并双击 VAR 控件，在弹出的属性对话框中添加变量  $R_j=80/(I^{0.9})$ 。

- (4) 在原理图设计窗口中执行【File】→【Design Parameters】命令，打开【Design Parameters】对话框，在【General Cell Definition】选项卡中对参数进行设置，如图 6.44 所示。单击【Save AEL file】按钮，写入修改值。

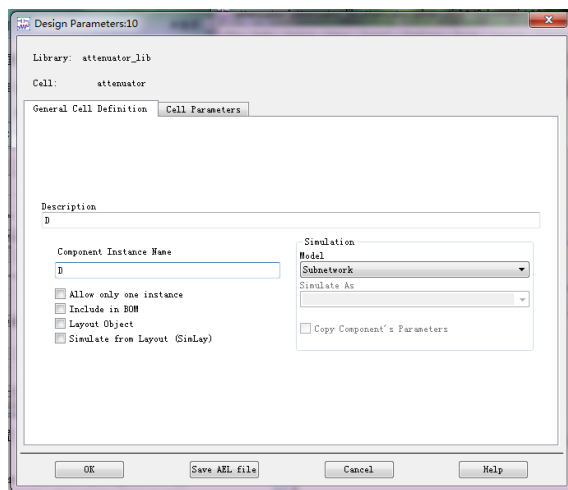


图 6.44 内建符号设置

- 选择【Cell Parameters】选项卡，在【Parameter Name】文本框中输入“T”，在【Default Value】文本框中输入“100”，单击【Add】按钮，将参数添加到内建模型中。最后选中【Display parameter on schematic】复选框，显示出变量值，单击【OK】按钮关闭对话框，如图 6.45 所示。最后单击【Save】按钮保存原理图并命名为“D”，二极管模型创建完毕。这样在后面的电路中就可以直接调用了。

- (5) 新建原理图，并命名为“attenuator”。

- (6) 在【Simulation-S\_Param】元件面板列表中选择 S 参数仿真控制器和 Term 端口，添加到原理图中，并设置起始扫描频率为 1GHz，终止频率为 2GHz，步长为 2MHz。

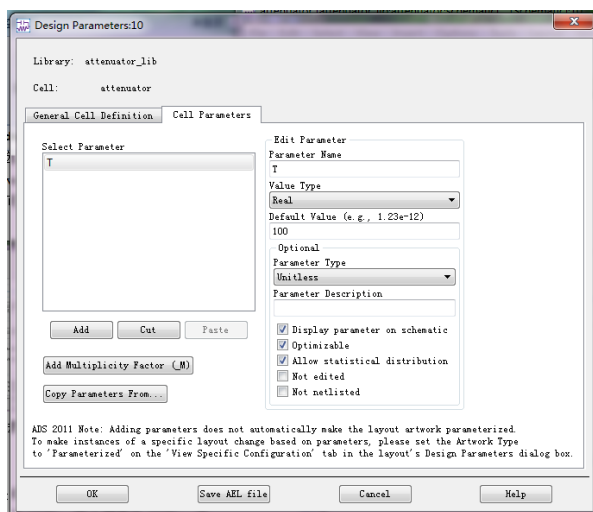


图 6.45 为符号添加参数

(7) 单击工具栏中的【Display Component Library List】按钮，弹出【Component Library】对话框，如图 6.46 所示。选择工程“attenuator”，并用鼠标右键单击 D 子电路，从弹出的快捷菜单中选择【Place Component】命令，移动鼠标到原理图设计窗口中，就可以插入二极管 D 了，依次插入 D1、D2，并将 D1 的 I 值设为 0.01，D2 的 I 设为 100。

(8) 在【Lumped-Components】元件面板列表中选择电阻并插入到原理图中，R1、R2 电阻值为  $50\Omega$ ，连接后的原理图如图 6.47 所示。假设此时二极管 D1 截止，D2 导通。

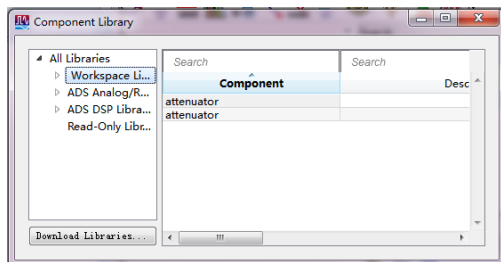


图 6.46 在原理图中插入电路符号

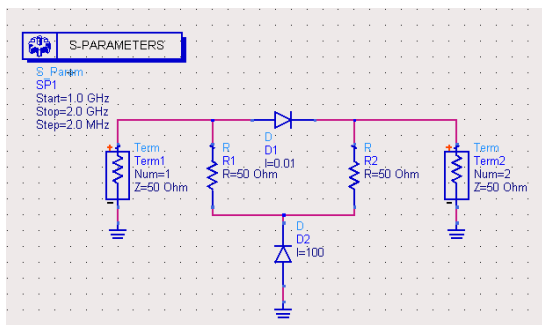


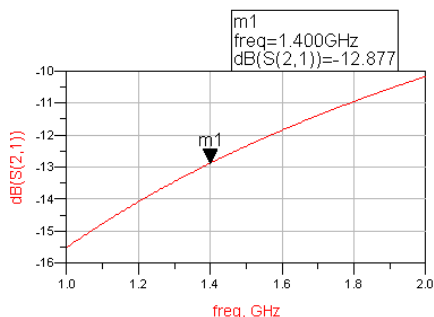
图 6.47 衰减器原理图

(9) 进行仿真。仿真结束后系统自动弹出数据显示窗口，在数据显示窗口中选择矩形图并插入到图形显示区域中，添加变量  $S(2, 1)$ ，选择单位为 dB，单击【OK】按钮确定后，在图形显示窗口就出现  $S(2, 1)$  随频率的变化曲线，添加一个 marker 并拖动到 1.4GHz 处。结果如图 6.48(a)所示。从图中可以看出， $S(2, 1)$  为  $-12.877\text{dB}$ ，说明此时衰减器衰减较大，整个频带内的衰减大于 10dB，且 1.4GHz 处  $S(2, 1) = -12.877\text{dB}$ ，满足指标要求。

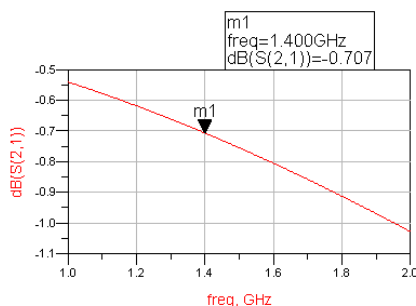
(10) 若将图 6.47 中的 D1 和 D2 中的 I 数值对调，即假设 D1 导通、D2 截止，令 D1 中的  $I=100$ ，D2 中的  $I=0.01$ ，结果如图 6.48(b)所示。

从图中不难看出，此时衰减较小，整个频带内的衰减小于 1.1 dB，1.4GHz 处  $S(2, 1) = -0.707\text{dB}$ ，满足指标要求。

至此就完成了衰减量可调的有源衰减器的 ADS 仿真，仿真结果基本满足指标要求。



(a) 高衰减仿真结果



(b) 低衰减仿真结果

图 6.48 衰减器仿真结果

## 6.3 移 相 器

### 6.3.1 移相器基本原理

移相器应用于微波通信、雷达和测量系统中，它是一种二端口网络，用于提高输出和输入信号之间相位差，由控制信号（直流偏置）来控制。移相器的分类比较复杂，不同种类的移相器的工作原理也有很大差别。移相器是一种用来校正传输相位的微波组件，它一般被分为数字移相器和模拟移相器。数字移相器的相位差值只能通过一些预定的离散值进行改变；而模拟移相器的相位差值可以通过相应的控制信号的连续变化以连续方式改变。

数字移相器在相控阵天线系统得到了广泛应用。相位控制信号加到阵列的各个单元，使得辐射波束受控于电子扫描方向。在微波频段设计数字移相器有两种不同方法。第一种方法利用铁氧化磁性材料的可开关移相性能；第二种方法主要是采用半导体或 MEMS 器件。一般来说，采用半导体或 MEMS 器件的移相器与铁氧体移相器相比更紧凑，具有更小的开关时间和较低的激励功率。

采用半导体器件的移相器可以分为反射型移相器和传输型移相器。在反射型移相器中，基本的设计单元是一端口网络，且其反射信号相移由控制信号产生变化。这种基本单端口移相器可用环流器，也可以用混合桥来变换成两端口元件。由于容易集成，混合电桥耦合的反射型移相器更为常用。至于单端口反射型移相器的设计，可以采用开关长度型和开关电抗型设计。对于传输型半导体移相器，大致可以分为三类，即开关线型移相器、负载线型移相器和开关网络型移相器。

### 6.3.2 设计实现移相器

本节将给出一个改进的负载线型移相器的 ADS 仿真实例，具体指标要求如下。

- 工作频带为 3~5GHz，中心频率为 4GHz。
- 采用并联电容形式时，4GHz 处两端口间的相位差为  $101^\circ$ ，且此时的  $S_{21} \geq -0.01\text{dB}$ ， $S_{11} \leq -60\text{dB}$ 。
- 采用并联电感形式时，4GHz 处两端口间的相位差为  $78^\circ$ ，且此时的  $S_{21} \geq -0.01\text{dB}$ ， $S_{11} \leq -80\text{dB}$ 。



- (1) 执行【File】→【New Workspace】命令，新建工程“phase shift”。
- (2) 新建原理图，并命名为“improved-switch-line-Phashi”。
- (3) 在原理图设计窗口中，从【TLines-Microstrip】元件面板列表中选择微带线【MLIN】和【MSUB】，并添加到原理图中，如图 6.49 所示。
- (4) 双击刚添加的【MSUB】，在弹出的对话框中按照如图 6.50 所示设置微带基本参数。

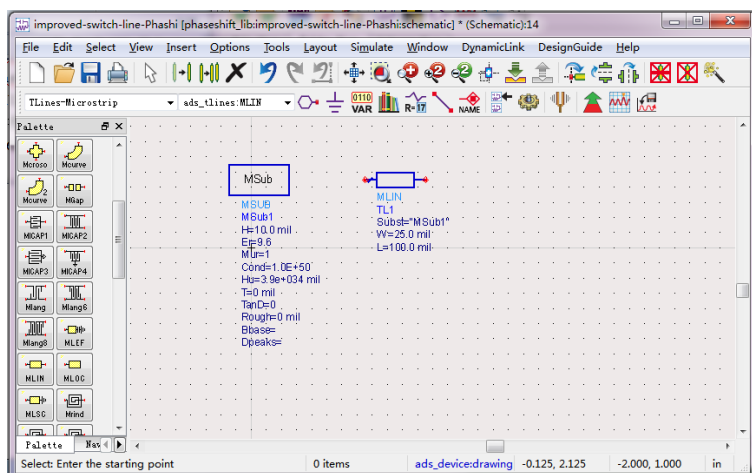


图 6.49 将【MLIN】和【MSUB】添加到原理图中

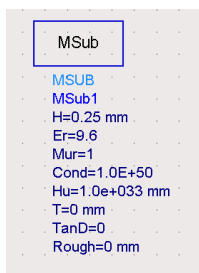
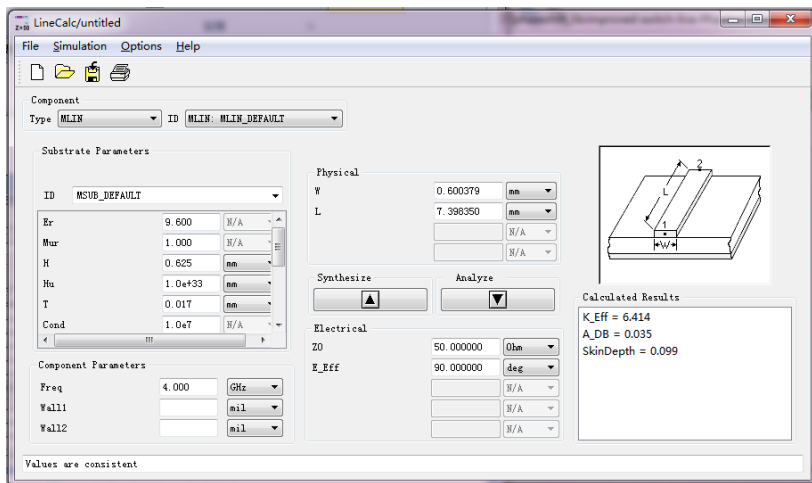


图 6.50 设置微带线基本参数

- (5) 运行 LineCalc 工具计算电长度为  $90^\circ$  微带传输线的物理长度。执行【Tools】→【LineCalc】→【Start LineCalc】命令，弹出【LineCalc/untitled】对话框。选择【MLIN: MLIN\_DEFAULT】，公共参数显示窗口包含了介质基片参数设置栏和元件参数设置栏两部分。根据所用的介质参数经 LineCalc 计算得特性阻抗为  $50\Omega$  的  $90^\circ$  微带线的宽度为 0.6mm，长度为 7.398mm，如图 6.51 所示。

图 6.51 计算电长度为  $90^\circ$  的传输线

- (6) 按照计算的结果修改一般微带线 MLIN 的参数。
- (7) 在原理图设计窗口中的【Simulation-S\_Param】元件面板列表中选择 S 参数仿真控制

器, 设置起始频率为 3GHz, 终止频率为 5GHz, 扫描步长为 4MHz, 并把两个 Term 端口添加到原理图中。

(8) 在原理图设计窗口中的【Lumped-Components】元件面板列表中选择两个电感 L 和两个电容 C, 并添加到原理图中。单击工具栏中的【VAR】图标, 并添加变量 L、C (分别赋值为 9.9 和 0.159), 分别将电感、电容值修改为 L、C, 如图 6.52 所示。

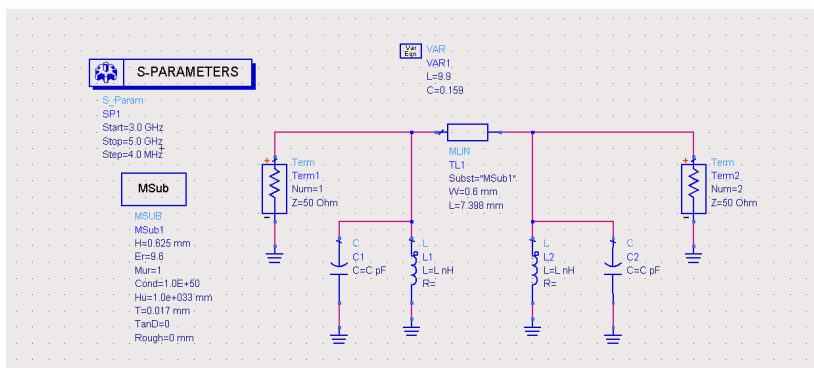



图 6.52 创建移相器原理图

(9) 单击工具栏中的  图标, 再依次单击电感 L1 和 L2, 关掉电感, 如图 6.53 所示。

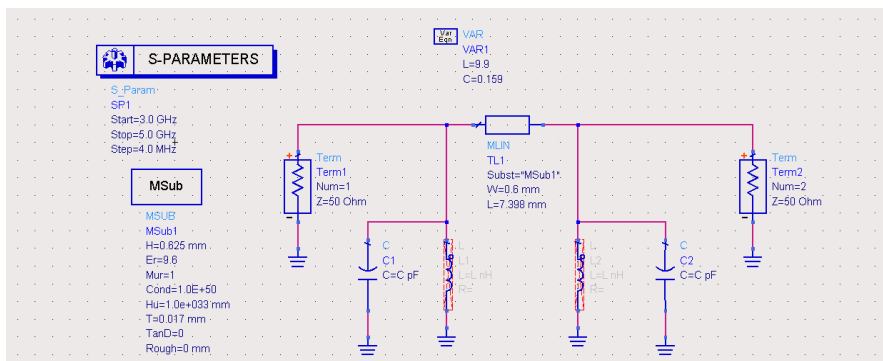



图 6.53 关掉电感 L1 和 L2

(10) 运行仿真。仿真结束后系统自动弹出数据显示窗口, 在数据显示窗口中选择矩形图并插入到图形显示区域中, 添加变量 S (2, 1), 选择单位为 Phase, 单击【OK】按钮确定后, 在图形显示窗口就出现 S (2, 1) 的相位随频率的变化曲线, 4GHz 处可得此处的相移为  $-101.519^\circ$ , S21 插入损耗非常小, S11 =  $-33.877\text{dB}$  满足指标要求, 如图 6.54 所示

(11) 单击工具栏中的  图标, 再依次单击 L1、L2、C1、C2, 关掉电容, 打开电感, 切换到电感模式, 如图 6.55 所示。

(12) 运行仿真。仿真结束后系统自动弹出数据显示窗口, 在数据显示窗口中选择矩形图并插入到图形显示区域中, 添加变量 S (2, 1), 选择单位为 Phase, 单击【OK】按钮确定后, 在图形显示窗口就出现 S (2, 1) 的相位随频率的变化曲线。添加 marker 并拖动到 4GHz 处可得此处的相移为  $-78.399^\circ$ ; S21 插入损耗非常小, S11 为  $-33.758\text{dB}$ , 都满足指标要求, 如图 6.56 所示。

至此, 就完成了改进的负载线型移相器的 ADS 仿真, 仿真结果基本满足指标要求。



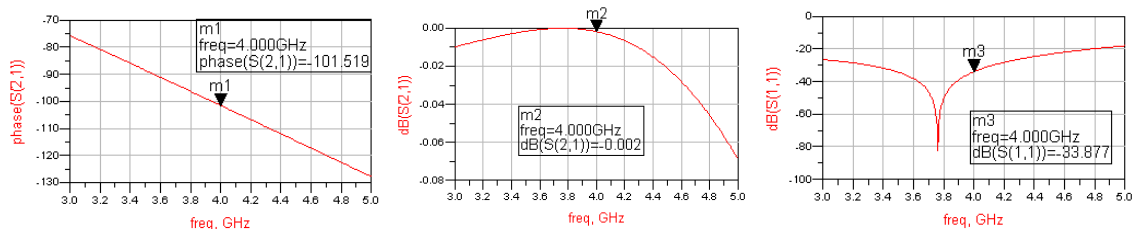


图 6.54 仿真结果

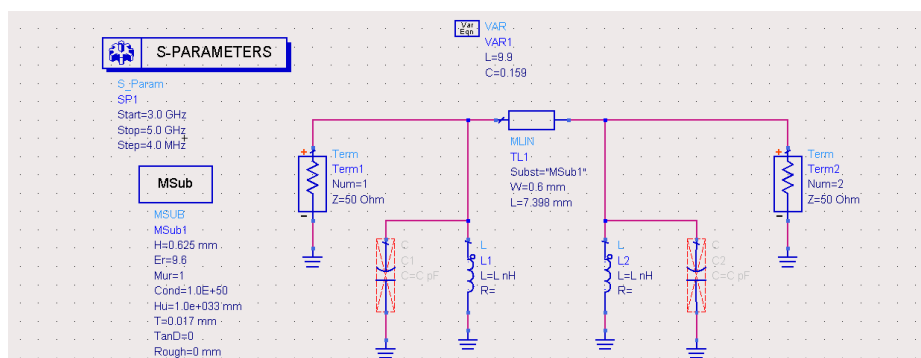


图 6.55 关掉电容打开电感

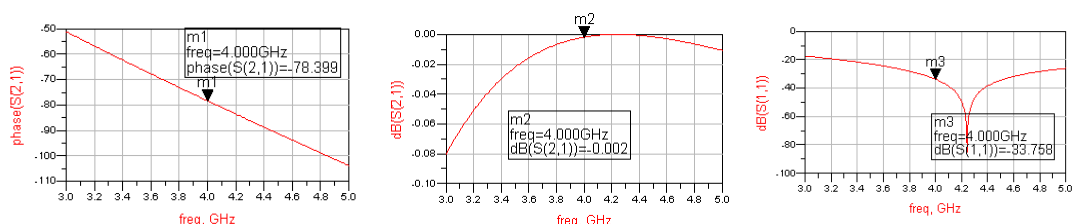


图 6.56 仿真结果

## 6.4 锁相环

目前, PLL 半导体芯片的供应商主要包括模拟器件公司 (ADI)、美国国家半导体公司 (NS) 和得州仪器 (TI) 等, 市场上的主要型号包括 ADF4111 (ADI)、LMX2346 (NS) 和 TRF3750 (TI)。

### 6.4.1 锁相环基本原理

锁相环电路基本框图由 4 大部分组成, 即压控振荡器 (VCO)、鉴相器 (PD)、分频器 (Div) 和低通滤波器 (LPF), 如图 6.57 所示。

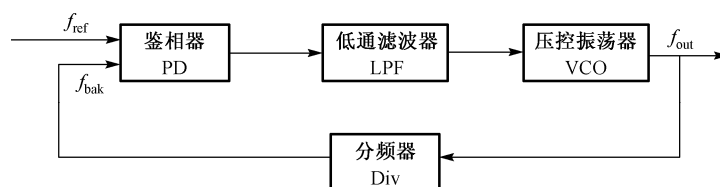


图 6.57 锁相环基本框图

(1) 压控振荡器 (VCO): 产生振荡信号。它的输出频率受直流电压控制, 大多数 VCO 的输出频率随控制电压升高而升高, 即具有正斜率。

(2) 分频器 (Div): 对 VCO 的输出频率进行分频, 使频率降低, 以便于处理。

(3) 鉴相器 (PD): 对输入的参考频率  $f_{\text{ref}}$  和分频后的  $f_{\text{bak}}$  进行相位比较, 并根据  $f_{\text{ref}}$  与  $f_{\text{bak}}$  相位差, 产生 (输出) 对应的准 DC 电压。

(4) 低通滤波器 (LPF): 对鉴相器输出的电压进行滤波, 为 VCO 提供纯净的 DC 控制电压, 同时为系统提供一定的稳定裕量, 该低通滤波器也称为环路滤波器。

PLL 是一个频率/相位的自动控制系统。如果  $f_{\text{out}}$  偏离期望的频率, 则  $f_{\text{bak}}$  与  $f_{\text{ref}}$  产生相差。此时, 鉴相器会根据该相差输出对应的控制电压去迫使  $f_{\text{out}}$  回到期望的频率; 当  $f_{\text{ref}}$  变化时, 鉴相器的两个输入频率会产生一定的频差, 接着鉴相器输出电压会随相差的大小而改变, 迫使  $f_{\text{out}}$  变化到对应的频率, 以保证  $f_{\text{bak}}$  与  $f_{\text{ref}}$  相等。也就是说, 可以通过改变  $f_{\text{ref}}$  使  $f_{\text{out}}$  变化到希望的频率, 同时  $f_{\text{out}}$  还能够自动跟踪  $f_{\text{ref}}$  的变化, 这个特点使 PLL 能够用做频率合成器和调制/解调器。

### 1) 锁相环系统参数

锁相环系统具有以下几个较为重要的技术指标。

(1) 频率准确度: 实际输出频率  $f_{\text{out}}$  与标称输出频率  $f_0$  之差, 一般由分频数  $N$  与参考源  $f_{\text{ref}}$  决定。

(2) 频率稳定度: 在一定时间间隔内, 频率的相对变化程度  $(f - f_0) / f_0$ , 单位为 ppm( $10^{-6}$ ) 或 ppb( $10^{-9}$ ), 该指标一般由参考源  $f_{\text{ref}}$  决定。

(3) 频率精度: 相邻两个输出频率的最小间隔。对于整数分频, 频率精度等于  $f_{\text{ref}}$ ; 对于小数分频, 频率精度可为任意小。

(4) 频率范围: 锁相环系统输出频率的范围。该指标由 VCO 频率范围和锁相环芯片内的分频器共同决定。

(5) 换频时间: 锁相环系统输出信号从一个频率切换到另一个频率时, 输出从突变到重新进入稳定状态所用的时间。该指标由系统阻尼系数和环路带宽决定。

(6) 频谱纯度: 由输出信号的相位噪声和杂散来衡量, 带内相位噪声主要由参考源、鉴相器和电荷泵决定; 带外相位噪声主要由 VCO 决定。

### 2) 计算环路滤波器

在实际的工程应用中, 分频器、鉴相器与电荷泵这 3 部分都已经被封装于锁相环 IC 里, 工程师所需要做的基本上只是根据系统要求计算出合适的环路滤波器并调试。

下面以如图 6.58 所示的 2 阶无源环路滤波器为例, 介绍各元器件值的求解过程。因计算过程较为烦琐, 这里只给出求解方法, 并不进行实际的运算。

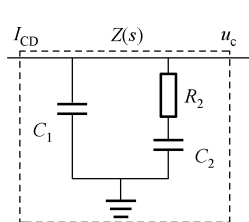


图 6.58 2 阶无源环路滤波器

该滤波器的传输函数为

$$Z(s) = \frac{R_2 C_2 s + 1}{R_2 C_1 C_2 s^2 + (C_1 + C_2)s}$$

则锁相环系统的开环传递函数为

$$G_k(s) = \frac{K_d K_v (1 + R_2 C_2 s)}{N(C_1 + C_2)s^2 \left(1 + \frac{R_2 C_1 C_2}{C_1 + C_2} s\right)}$$

令  $T_1 = \frac{R_2 C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ 、 $T_2 = R_2 C_2$ , 把上式的  $s$  换成  $j\omega$ , 则有

$$G_k(j\omega) = -\frac{K_d K_v (1 + j\omega T_2)}{NC_1 \omega^2 (1 + j\omega T_1)} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

从上式可以看出, 系统的相位函数为

$$\phi[G_k(j\omega)] = \arctan T_2 \omega - \arctan T_1 \omega - \pi$$

为了保证环路的稳定, 通常期望在开环增益降为 0dB ( $\omega = \omega_c$ ) 时系统具有最大相位裕度 (一般选为  $45^\circ$ ), 即该点是相位曲线的拐点, 因此可得

$$\gamma = \pi + \phi[G_k(j\omega_c)] = 45^\circ$$

$$\left. \frac{d\phi[G_k(j\omega)]}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_c} = 0$$

根据定义, 开环增益在  $\omega_c$  处降为 0dB, 即

$$G_k(\omega_c) = 1$$

由于环路滤波器的计算过于复杂, 一般不会采用手工计算, 通常会借助各种仿真软件来求解。一些 PLL IC 供应商也会提供相应的软件给用户使用, 如 ADI 的 ADIsimPLL 工具。用户可以根据软件完成大部分的参数设定与求解, 甚至到典型电路图的生成。

### 3) ADF4111 芯片

ADF4111 芯片为整数分频芯片, 最高应用频率是 1.2GHz, 如图 6.59 所示为 ADF4111 的功能框图。

(1)  $RF_{IN}A$  为振荡信号输入口, 其信号来自 VCO。该端口能接受的输入频率范围是 80~1200MHz, 3V 供电时输入信号的幅度范围为 -15~0dBm。

(2)  $REF_{IN}$  为参考信号输入口, 其信号来自参考源 (如 TCXO)。该端口能接受的输入频率范围是 5~104MHz, 输入幅度要求至少为 -5dBm。

(3) 鉴相器能接受的最大的输入频率为 55MHz, 因此需要确保分频后  $f_{ref}$  和  $f_{bak}$  不超过该值。

(4) 电荷泵电流  $I_{cp}$  可通过写寄存器控制, 一共有 8 挡, 其范围由外部电阻  $R_{set}$  决定。

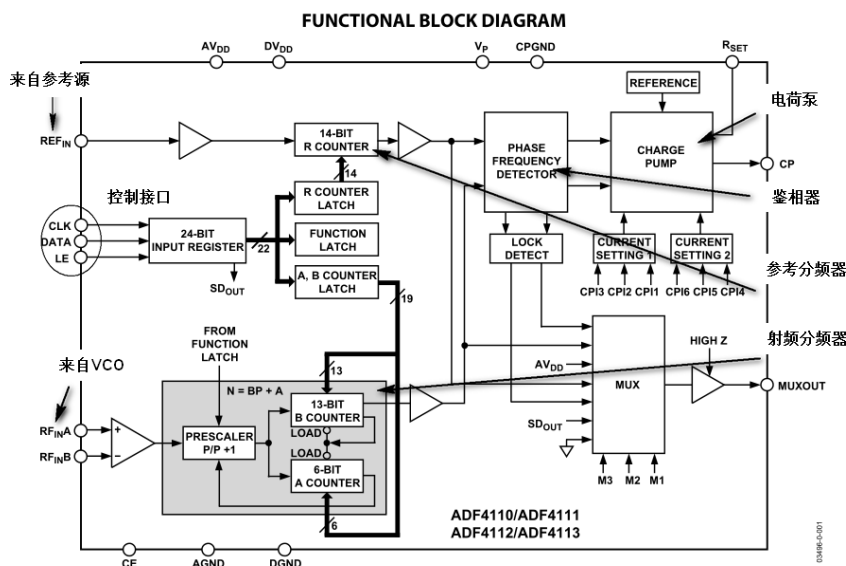


图 6.59 ADF4111 的功能框图

## 6.4.2 设计实现锁相环

### 1. 系统参数

本例窄带项目采用 PLL 芯片 ADF4111, 各个系统模块的参数如下:

- (1) VCO 频率范围: 880~920MHz。
- (2) VCO 压控增益: 12MHz/V。
- (3) VCO 相位噪声:  $-30\text{dBc/Hz}@10\text{Hz}$ ,  $-80\text{dBc/Hz}@1\text{kHz}$ ,  $-120\text{dBc/Hz}@100\text{kHz}$ , 噪底为 $-140\text{dBc/Hz}$ 。
- (4) 参考源频率: 10MHz。
- (5) 参考源相位噪声:  $-90\text{dBc/Hz}@10\text{Hz}$ ,  $-130\text{dBc/Hz}@1\text{kHz}$ ,  $-145\text{dBc/Hz}@100\text{kHz}$ , 噪底为 $-150\text{dBc/Hz}$ 。
- (6) 系统频率间隔: 200kHz。

由于 ADF4111 是整数分频芯片, 因此鉴相频率应选为系统频率间隔, 即 200kHz, 则参考分频器的分频比应设置为 50, 分频器的分频比应设置为  $4500\pm 50$ ; 芯片的电荷泵电流选取典型值 5mA。

### 2. 设计目标

- (1) VCO 输出频率:  $900\pm 10\text{MHz}$ 。
- (2) 锁定时间:  $<300\mu\text{s}$ 。
- (3) VCO 相位噪声: 优于 $-75\text{dBc/Hz}@1\text{kHz}$ ,  $-110\text{dBc/Hz}@100\text{kHz}$ 。
- (4) 采用无源 3 阶环路滤波器。
- (5) 系统环路带宽为  $\omega_c = 10\text{kHz}$  (环路带宽通常设置为鉴相频率  $f_{\text{ref}}$  的 1/20 左右)。
- (6) 相位裕度  $\gamma = 45^\circ \sim 50^\circ$ 。

下面应用 ADS 进行锁相环设计

### 3. 计算环路滤波器

- (1) 启动 ADS, 新建工程 “ADS\_PLL\_prj”, 如图 6.60 所示。

(2) 新建原理图, 并命名为 “Frequency\_Synthesizer”。在原理图设计窗口执行【Design Guide】→【PLL】命令, 在弹出的【PLL】对话框中单击【Select PLL Configuration】项, 如图 6.61 所示。此时弹出【Phase Locked Loop】对话框, 如图 6.62 所示。在【Type of Configuration】选项卡中选择【Frequency Synthesizer】项, 即将系统类型选择为 “频率合成器”。

(3) 单击【Simulation】选项卡, 选择【Loop Frequency Response】项, 即将仿真类型设置为 “查看环路频率响应”, 如图 6.63 所示。

(4) 单击【Phase Detector】选项卡, 选择【Charge Pump】项, 将鉴相器设置为 “基于电荷泵结构”, 如图 6.64 所示。

(5) 单击【Loop Filter】选项卡, 选择【Passive 4 Pole】项, 将环路滤波器设置为 “无源 4 阶滤波器”, 如图 6.65 所示。

(6) 设置完毕后, 单击【OK】按钮, 系统会根据设置后选项自动生成如图 6.66 所示的仿真原理图。

原理图基本可分为 5 大部分。

第一部分是用于仿真系统闭环特性，如图 6.67 所示，这里不需要修改。

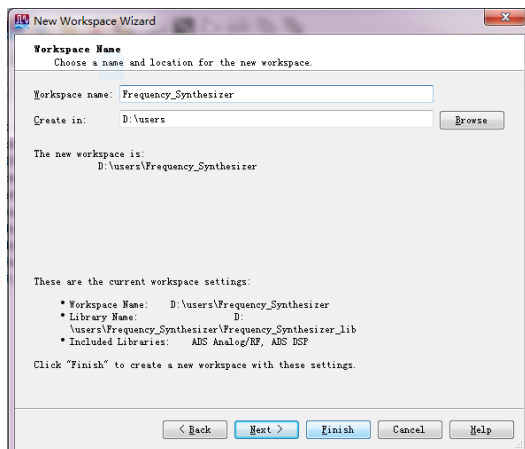


图 6.60 新建工程

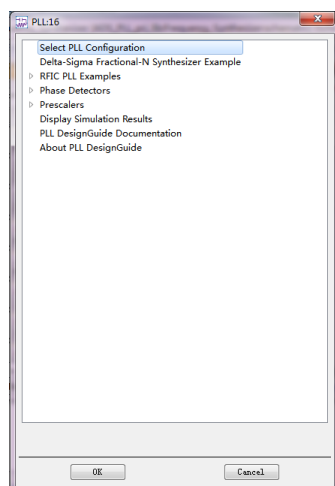


图 6.61 PLL 系统设置图

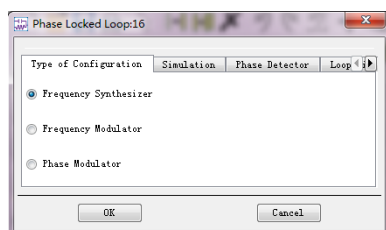


图 6.62 设置系统类型

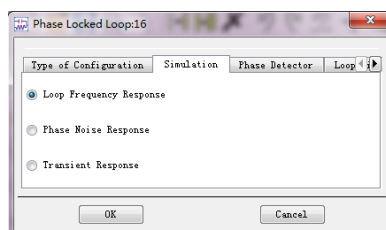


图 6.63 设置仿真类型

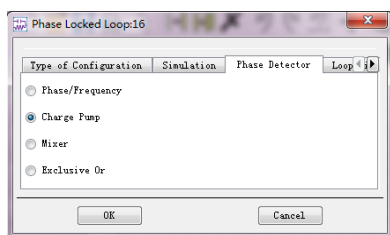


图 6.64 设置鉴相器类型

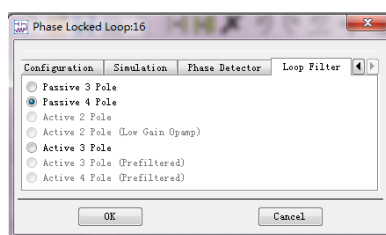


图 6.65 设置为 4 阶系统

第二部分是变量设置区，用于设置环路各个参数。

第三部分是用于仿真系统开环特性。

第四部分是用于仿真环路滤波器频率响应，求得的 Filt\_out 被用作计算的中间值。

第五部分是仿真所需的仿真器、优化器、优化目标及公式编辑器。

下面将详细介绍这 5 部分电路的功能与作用。

在原理图第一部分中，鉴相增益、滤波器器件值、VCO 压控增益和分频值等各模块的参数都被设置成变量，统一放在第二部分的变量设置区内进行设置，如图 6.67 所示。信号源不需要设置。

原理图中第二部分是系统变量设置区，应根据实际的系统参数和设计目标进行元件参数设定，如图 6.68 所示。

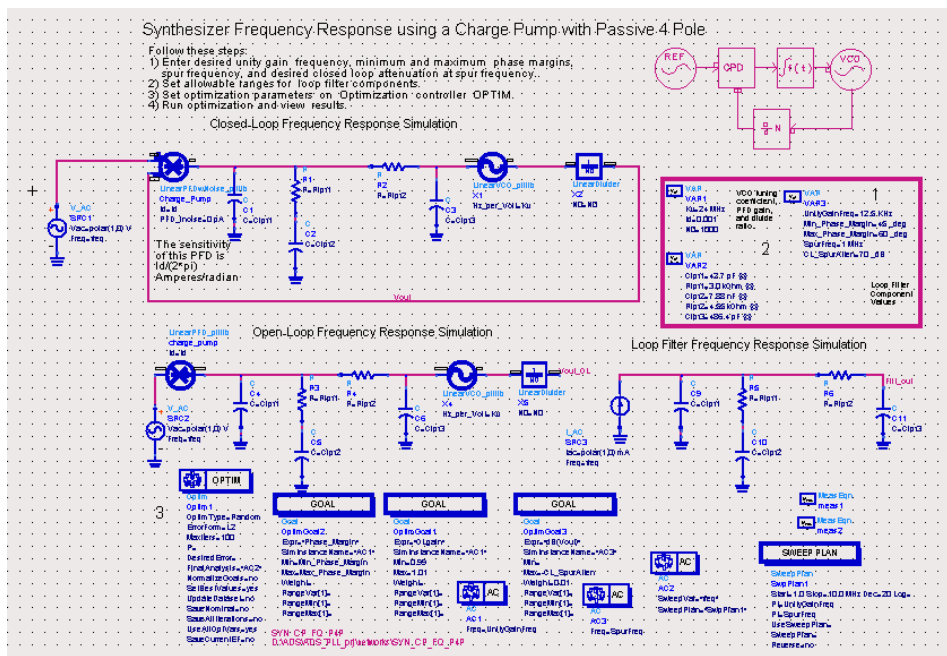


图 6.66 锁相环仿真原理图

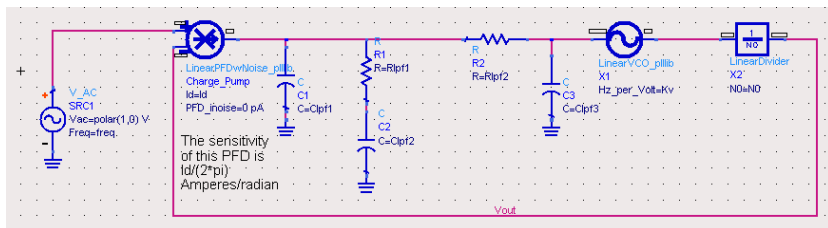


图 6.67 原理图第一部分

变量列表 VAR1 内存储的是环路各模块的参数, “Kv” 是 VCO 调谐增益 (压控增益), 这里改为 12MHz; “Id” 是电荷泵电流, 改为 0.005, 即 5mA; “N0” 是射频分频器的分频数, 改为 4500 (这里一般取实际分频数的中间值, 即  $900\text{MHz}+200\text{kHz}=4500$ )。

变量列表 VAR2 内存储的是环路滤波器的器件值。这些器件值稍后将通过 ADS 的自动优化计算出来, 这里需要预先指定器件变量的初始值和优化范围。双击 VAR2 的图标, 弹出变量设置窗口, 设置后如图 6.69 所示。

变量列表 VAR3 内用于设置目标参数。“Unity Gain Freq” 是期望的环路带宽, 设置为 10kHz; “Min\_Phase\_Margin” 和 “Max\_Phase\_Margin” 是期望的最小与最大相位裕度, 最大值改为 50\_deg; Spur Freq 和 CL\_Spur Atten 是杂散频率和杂散频率处的衰减值, 一般不需要改动, 保留原值即可。

第三部分和第四部分情况与第一部分类似, 不需要做任何改动。

原理图第五部分如图 6.70 所示。这里有 3 个交流仿真器、1 个优化器、3 个优化目标、2 个公式编辑器和 1 个扫描计划。

扫描计划 (Sweep Plan): 用来设定扫描的范围, 这里不需要做任何改动。

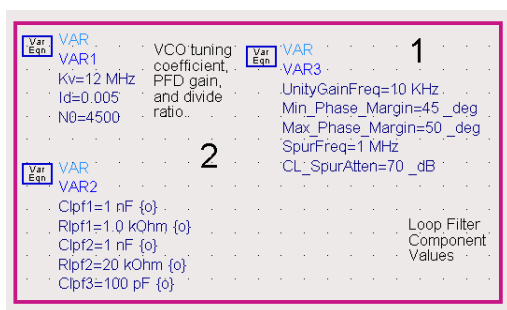


图 6.68 原理图第二部分

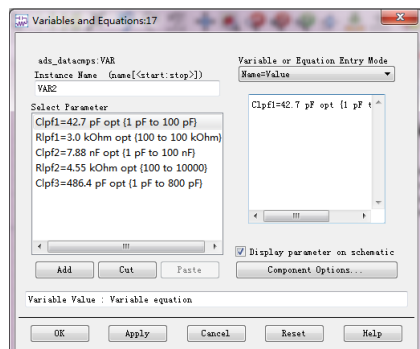


图 6.69 设置 VAR2

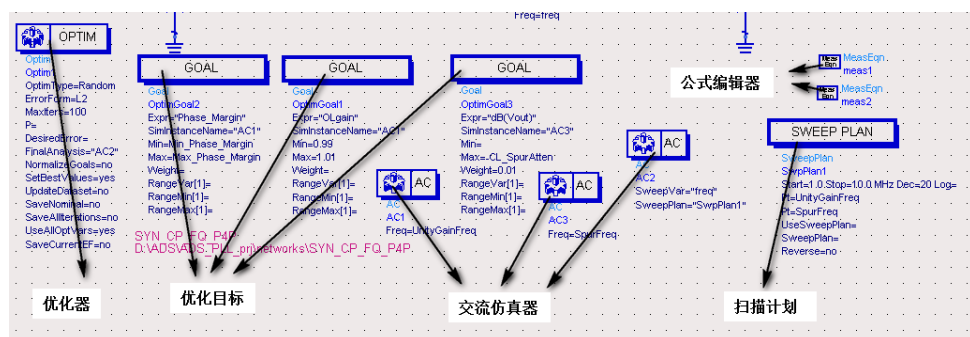


图 6.70 原理图第五部分

交流仿真器 (AC): 用于设定该原理图采用小信号交流仿真 (AC Small-Signal Simulation)。其中, AC1 设置为单频点仿真, 频率为环路带宽的值, 可以是 10kHz, 也可以是 UnityGainFreq; AC3 也设置为单频点仿真, 频率为之前所设定的 SpurFreq, 即 1MHz, 如图 6.71 所示; AC2 设置为使用扫描计图 6.72 所示。



图 6.71 AC1 与 AC3 的设置



图 6.72 AC2 的设置

公式编辑器 (MeasEqn): 如图 6.73 所示, “OLgain” 为系统的开环增益; “Phase\_OL” 为开环输出的相位; “Phase\_Margin” 为相位裕度。

优化器 (OPTIM): 用于设定优化算法的类型。自动生成的原理图模板内优化算法类型为 “Random” (随机类型), 效果不理想。这里把优化算法类型改成 “Hybrid” (混合类型), 迭代停止次数改成 “1000”, 如图 6.74 所示。

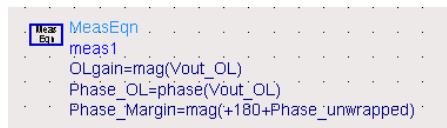


图 6.73 公式编辑器 meas1

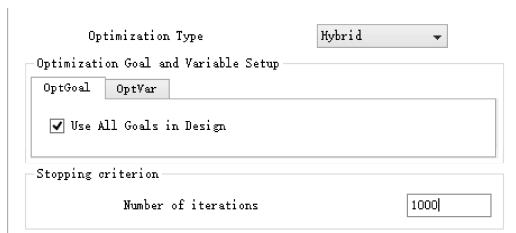


图 6.74 优化器设置

优化目标 (GOAL): 用于设置优化仿真的收敛条件, 可以把优化目标设置成期望的设计目标。

- OptimGoal1 优化参量设置为 “OLgain”, 即开环增益, 优化设置如图 6.75 所示。从图中可以看出, 优化目标使用 AC1 所指定的频率范围 (单频点 UnityGainFreq), 在该频点 (指定的环路带宽 10kHz 处), 系统的开环增益应满足  $0.999 < \text{OLgain} < 1.001$ , 接近 0dB。
- OptimGoal2 设置如图 6.76 所示。在指定的环路带宽 10kHz 处, 系统的相位裕度应满足  $45^\circ < \text{Phase\_Margin} < 50^\circ$ 。
- OptimGoal3 是杂散抑制的优化设置, 如图 6.77 所示。



图 6.75 优化目标设置



图 6.76 OptimGoal2 设置

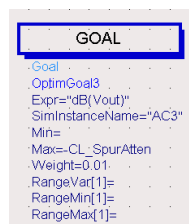




图 6.77 OptimGoal3 设置

至此, 就完成了原理图各个模块参数的设置。但是, 实际上通过 ADS 提供的 PLL 仿真模板计算出来的元器件值是无法使用的。因为得到的相位裕度虽然在 10kHz 处满足了限定的条件, 但相位裕度在 10kHz 处并不会达到最大, 极有可能造成系统不稳定。所以还需添加限定条件, 使相位裕度在 10kHz 处达到最大。

(7) 接下来, 在左侧元件列表中选中【Simulation-AC】, 在元件面板中单击  图标, 在原理图内添加一个 AC 仿真器 “AC4”, 设置如图 6.78 所示。注意: 在【Output】选项卡内不要选中【Node Voltages】和【Measurement Equations】两个选项; 否则, 仿真结果无法正确。

(8) 在左侧元件列表中选择 “Optim/Stat/Yield/DOE”, 并在元件面板中单击  图标, 添加两个优化目标, 具体配置如图 6.79 所示。因为仿真器 AC4 的频率范围是 9~11kHz, 仿真频率间隔是 500Hz, 所以仿真的频点数是 5 个。第 2 个频点的频率为 10kHz (ADS 以 0 代表



第一个), 则 Phase\_Margin[1]、Phase\_Margin[2]和 Phase\_Margin[3]就分别代表系统在 9.5kHz、10kHz 和 10.5kHz 处的相位裕度。通过添加这两个优化目标, 可以保证系统的相位裕度在 10kHz 处达到最大值。

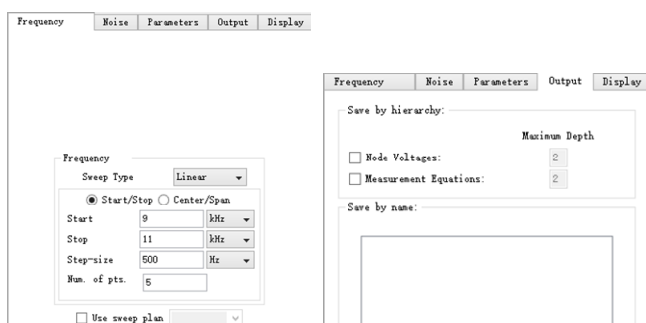



图 6.78 AC4 仿真器的基本设置



图 6.79 AC4 优化目标设置

(9) 配置好后, 单击  按钮, 进行仿真。仿真完成后, 系统会自动弹出数据显示窗口, 如图 6.80 所示。

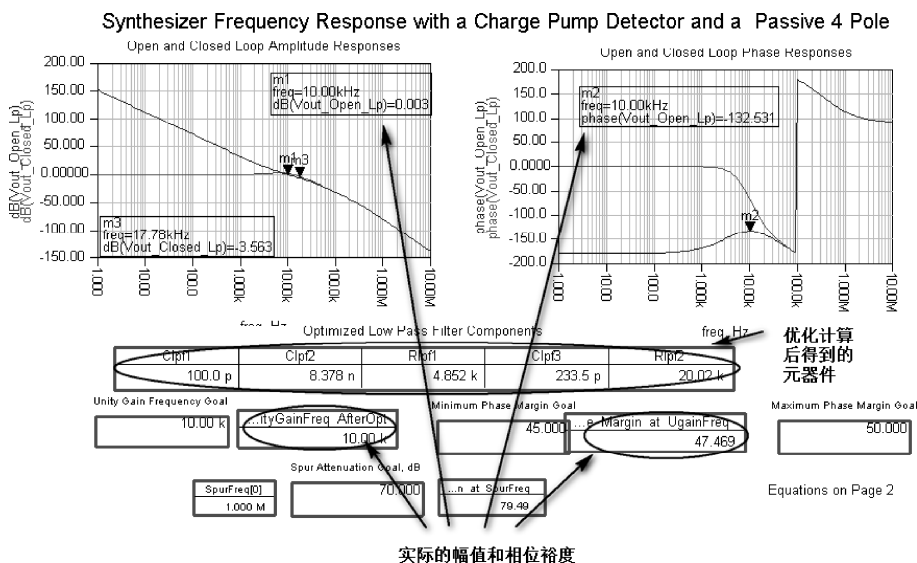


图 6.80 仿真结果

## 2. 查看 PLL 锁定时间

首先在 “ADS\_PLL\_prj” 工程中新建一个原理图, 执行【Design Guide】→【PLL】命令,

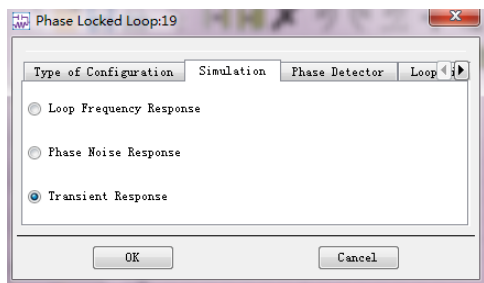


图 6.81 设置仿真类型

分是仿真器。

第一部分——参数设置区如图 6.83 所示。

VAR1: 环路滤波器参数设置, 根据图 6.67 中的 VAR2 仿真得到的数据进行设置。

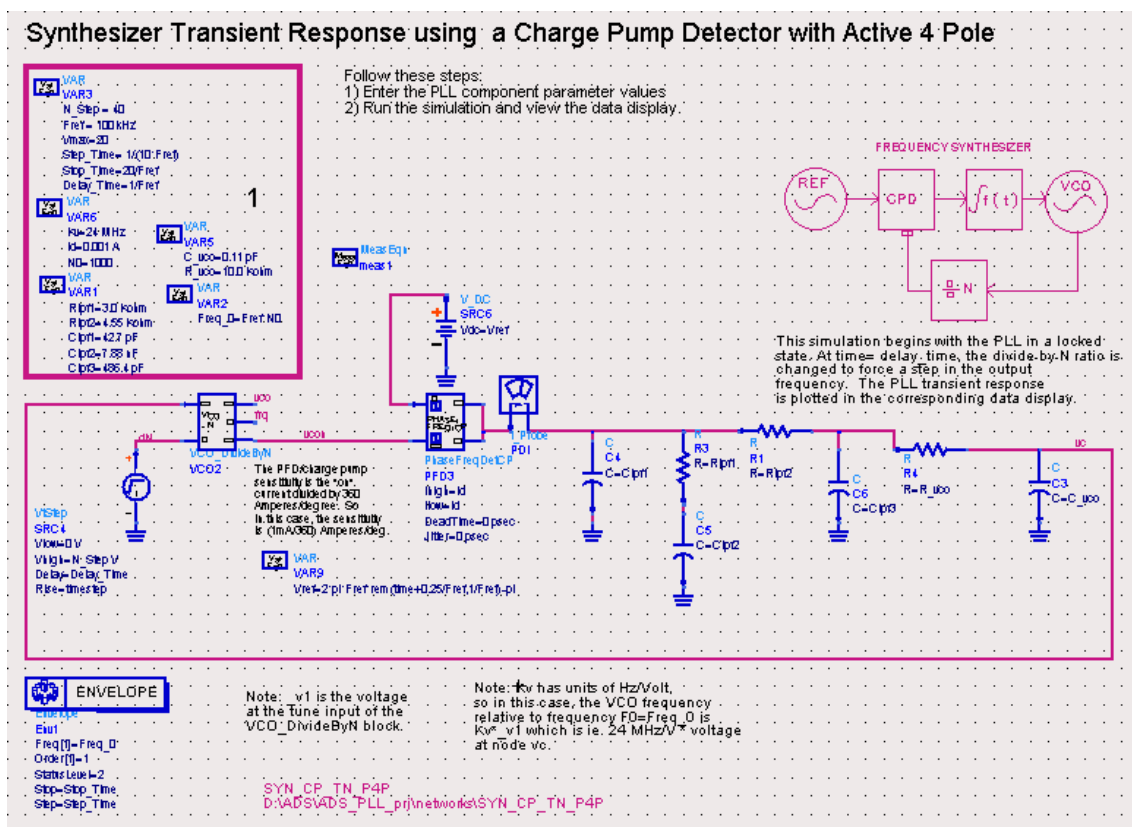


图 6.82 系统生成的仿真原理图

VAR2: “Freq\_0”是 VCO 起始频率, 即 VCO 在其调谐端的控制电压为 0V 时的输出频率。由于本例选用的 VCO 的起始频率为 880MHz, 因此把该值设置为 880MHz (只要比 890MHz 小就可以)。在实际项目中应根据 VCO 的实际参数进行填写。

VAR3: “N\_Sep”是 SRC4 的阶跃电压, 配置为 0; “Fref”是鉴相频率, 改为 200kHz; “Vmax”和 “Delay\_Time”不需要做改动; “Step\_Time”是包络仿真器 Envl 的仿真步长, 设置成  $1/(10 \times \text{Fref})$ , 即鉴相周期的 1/10; “Stop\_Time”是包络仿真器 Envl 的仿真结束时间,

改成  $100/\text{Fref}$ ，即 100 个鉴相周期，如果该值设置太短有可能会观察不到锁定时间。

VAR5: “C\_vco” 和 “R\_vco” 分别是 VCO2 的输入电容和输入电阻，保留原值即可。

VAR6: “Kv” 是 VCO2 的压控增益，根据前面的定义改为 12MHz; “Id” 是电荷泵电流，改为 5mA; “N0” 是分频比，改成 4500。

第二部分——系统仿真框图如图 6.84 所示。这里 PLL 环路被简化成 3 大部分：环路滤波器 (C4、R3、C5、R1、C6)、鉴相器+电荷泵 (PFD3) 和带分频器的 VCO (VCO2)。

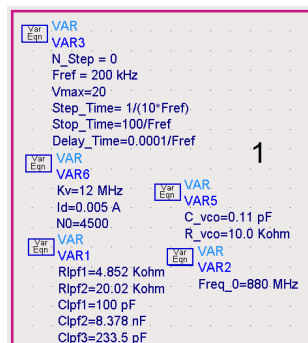


图 6.83 第一部分-参数设置区

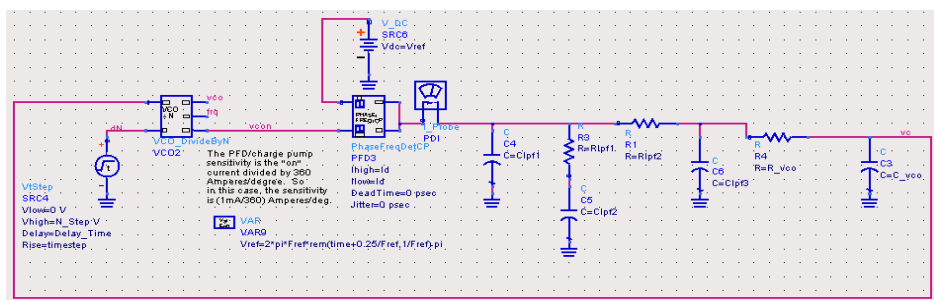



图 6.84 第二部分-系统仿真框图

VCO2: 内部带有分频器，分频比受阶跃电压源 SRC4 控制。因为我们只查看单一频点的锁定时间，所以可以把 SRC4 旁路掉，或者把其阶跃电压 N\_Step 配置成 0V。

PFD3: 输入一端来自 VCO2，一端来自信号源 SRC6 (时域、直流)。该鉴相器只需要输入信号的频率信息。信号源 SRC6 的电压值被设置成变量，由变量 VAR9 内的关系式决定，它的频率是 Fref，即 200kHz。信号源 SRC6 也可用一个交流信号源来替代。

滤波器: 各个元器件值统一在变量 VAR1 中设置。

第三部分的包络仿真器 Env1 不需要做任何改动。

单击  按钮进行仿真，仿真完成后系统自动弹出数据显示窗口，如图 6.85 所示。

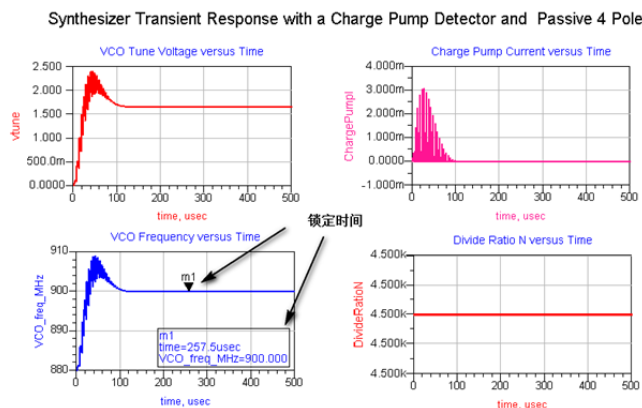


图 6.85 仿真结果

执行【Marker】→【New】命令，在“VCO Frequency Versus Time”曲线上加入 Mark 点。向右滑动 Mark 点，当所指示的 VCO 输出频率达到 900.000MHz 并且不再变化时，则可以认为此时 PLL 已经锁定。从图中可以看到，这个设计的锁定时间约为 257.5 $\mu$ s。

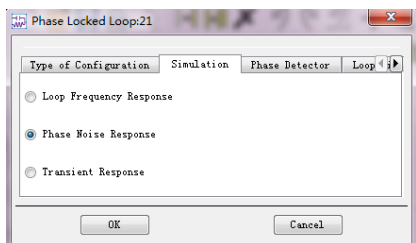


图 6.86 设置仿真类型

### 3. 估算相位噪声

(1) 在“ADS\_PLL\_prj”工程中新建一个原理图，执行【Design Guide】→【PLL】命令；弹出【PLL】对话框，单击【Select PLL Configuration】项，在弹出的对话框中设置系统类型、仿真类型、鉴相器和滤波器。本例将仿真类型设置为“查看环路相位噪声”，如图 6.86 所示，其他设置同前。

(2) 单击【OK】按钮，系统会根据这些选项自动生成如图 6.87 所示的仿真原理图。

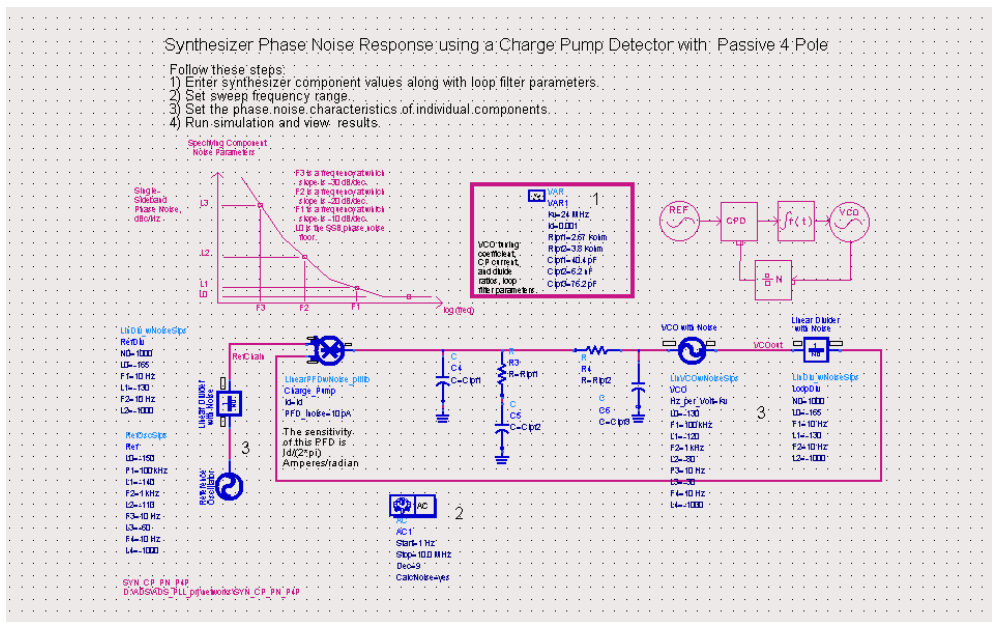


图 6.87 仿真原理图

仿真原理图分为 3 个部分：第一部分是变量设置区；第二部分是 PLL 环路模型；第三部分是仿真器。

(3) 首先根据前面的仿真结果，修改变量设置区内的各个参数，如图 6.88 所示。

(4) 接下来，需要设置 PLL 环路模型中各个模块的参数。根据本例所使用的参考源与 VCO 的实际性能，修改对应模块的参数，如图 6.89 和图 6.90 所示。

(5) 一般情况下，无法取得芯片内 RefDiv(参考分频器)、Charge.Pump(电荷泵)、LoopDiv(主分频器)等模块的具体参数。不过仿真模板内这些模块的默认值接近 PLL 芯片相关模块的实际值，不做修改也可以较为准确地估算环路的相位噪声。这里对 RefDiv 和 LoopDiv 做一些修改，如图 6.91 和图 6.92 所示。

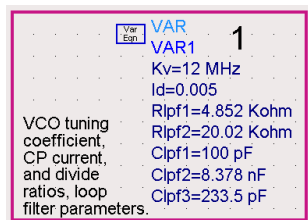


图 6.88 设置变量

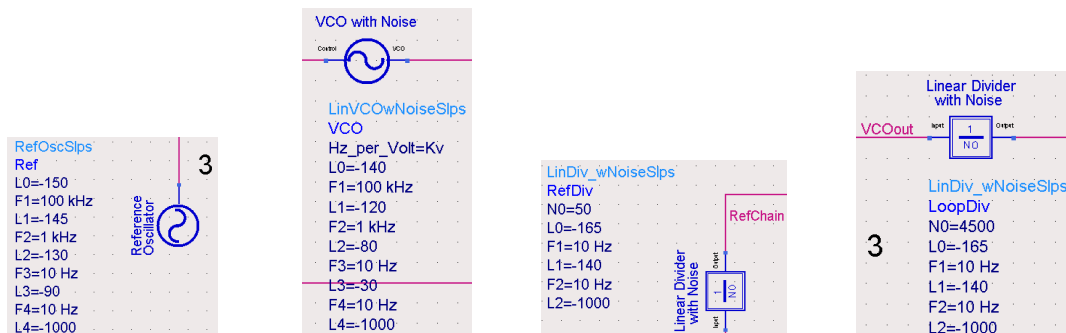


图 6.89 参考源参数设置 图 6.90 VCO 参数设置 图 6.91 参考分频器设置 图 6.92 主分频器设置

这样，PLL 环路模型部分就设置完成了。需要注意的是，Ref、RefDiv、VCO 和 LoopDiv 等模块还有下层原理图，可以单击工具栏上的 图标进行查看。在仿真结果显示窗口中将会用到各个内层原理图的节点。

(6) 第三部分的仿真器不需要做任何改动，只需确认计算噪声的选项被选中。双击仿真器 AC1，选择【Noise】选项卡，确认【Calculate noise】项及各个噪声节点被选中，如图 6.93 所示。这样系统会自动计算各个节点的噪声。其中，“VCO.VCO\_FR”节点在 VCO 模块的下层原理图中，该节点用于计算 VCO 自由振荡时的相位噪声。

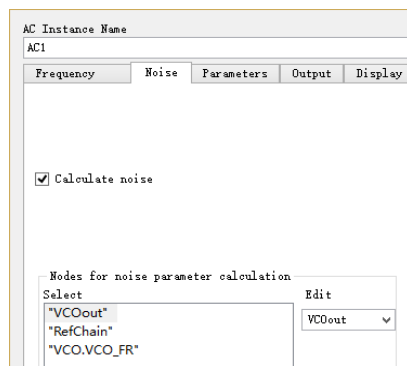


图 6.93 仿真器 AC1 的【Noise】选项卡

(7) 完成这些设置后，单击 按钮进行仿真。仿真完毕后系统自动弹出数据显示窗口，如图 6.94 所示。

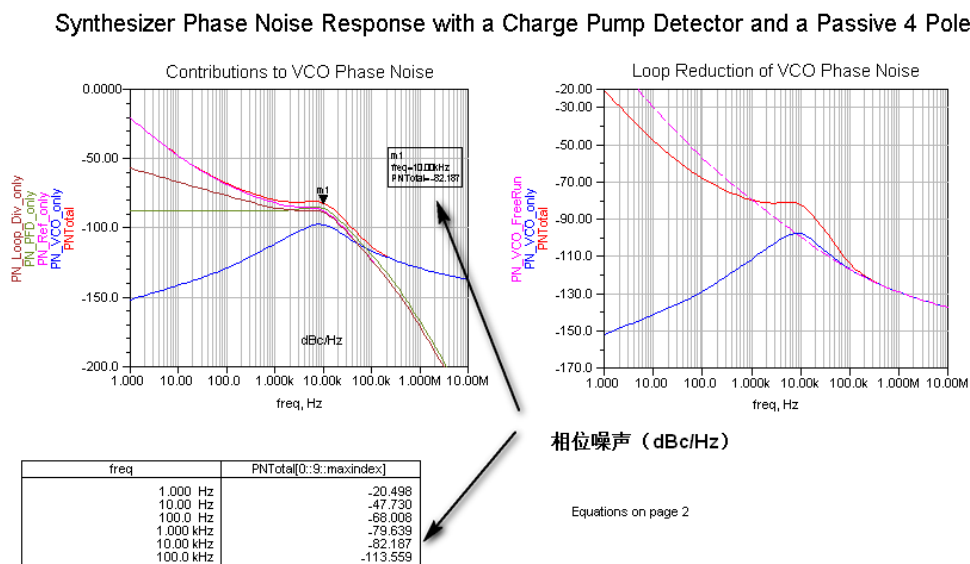



图 6.94 仿真结果

从图 6.94 中的曲线可以看出，在环路带宽之内，PLL 输出信号的相位噪声主要由参考源、

鉴相器（电荷泵）和分频器决定；而在环路带宽之外，相位噪声主要由 VCO 决定。也就是说，PLL 环路对参考源、鉴相器（电荷泵）和分频器的相位噪声呈低通特性，而对 VCO 本身的相位噪声呈高通特性。因此，参考源、鉴相器（电荷泵）和分频器处的低频干扰很容易耦合到输出信号上，在实际应用中需要注意这一点。

由仿真数据可知，本设计的输出信号相位噪声约为-82dBc/Hz@10kHz。

本仿真的数据显示窗口有两页，单击工具栏上的  按钮，切换到第 2 页，如图 6.95 所示。算式右边的变量是各个节点的噪声，包括各模块的内层原理图的相关节点。使用 what ( ) 函数可以查看算式中的一些多维变量代表什么含义。例如，编辑公式 temp=what (VCOout.NC.vnc)。然后，在数据表中显示 temp 的值。可以看到，VCOout.NC.vnc 是一个二维变量，它的第一维是频率 freq，第二维是索引 index。其中 index 列举于左边的数据表中。由此可知，VCOout.NC.vnc[:,7]表示所有频率处 VCO.SRC1 对 VCOout 节点贡献的噪声电压（.NC 表示 Noise Contribution）。

到这里就用 ADS 仿真完成了锁相环的整个前期设计评估。

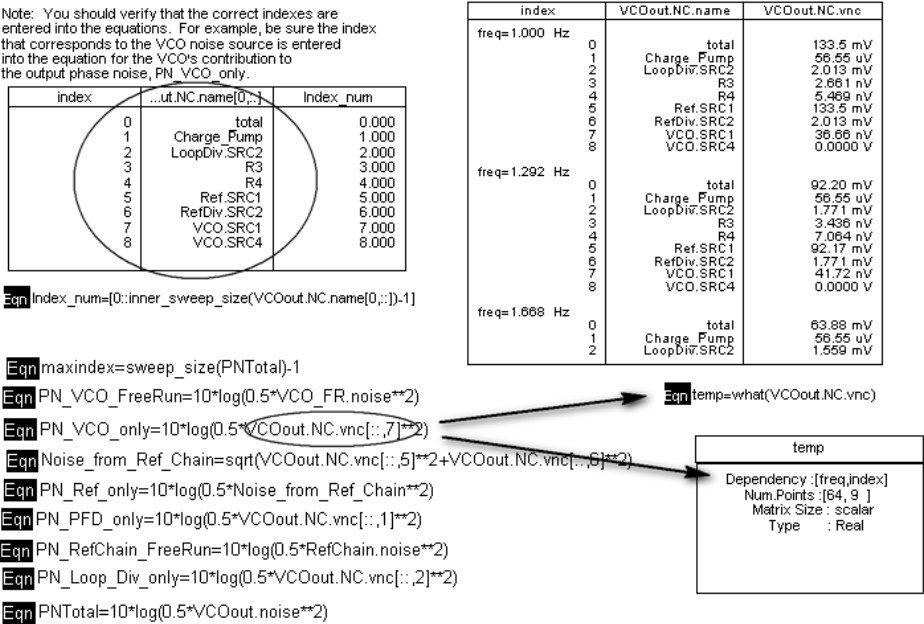


图 6.95 仿真数据显示窗口第 2 页

## 6.5 滤波器

集总参数低通滤波器是由电感和电容构成的，当技术指标不同时，电感和电容的取值也不同，本节学习如何设计集总参数低通滤波器，并给出符合技术指标的集总参数低通滤波器原理图。

### 6.5.1 集总参数低通滤波器设计向导

ADS 自带了集总参数滤波器设计向导，利用设计向导可以方便地设计出符合技术指标的集总参数低通滤波器。集总参数低通滤波器设计指标如下。

- ① 设计集总参数低通滤波器。
- ② 通带频率范围为  $0\sim 0.1\text{GHz}$ 。
- ③ 滤波器响应为切比雪夫 Chebyshev。
- ④ 通带内波纹为  $0.5\text{dB}$ 。
- ⑤ 在  $0.2\text{GHz}$  时衰减大于  $40\text{dB}$ 。
- ⑥ 特性阻抗选为  $50\Omega$ 。

下面介绍集总参数滤波器设计向导的使用方法。

### 1. 创建项目

下面将创建一个集总参数滤波器项目，本章所有的设计都将保存在这个项目之中。创建项目的步骤如下。

- (1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。
- (2) 选择主视窗中【File】→【New Workspace】命令，弹出【New Workspace Wizard】对话框，在【New Workspace Wizard】对话框中，项目名称定为 LC\_Filter，如图 6.96 所示。
- (3) 单击【Finish】按钮，则完成创建项目，同时建立原理图（untitled1）。

### 2. 创建原理图

创建原理图的方法很多，创建原理图的步骤如下。

- (1) 在未命名的原理图 untitled1 上，选择【File】→【Save As】命令，弹出【Save Design As】对话框。
- (2) 在【Save Design As】对话框中，输入文件名 Filter\_Lowpass1，然后单击【OK】按钮，将原理图命名为 Filter\_Lowpass1。

### 3. 利用设计向导生成集总参数低通滤波器原理图

- (1) 在原理图 Filter\_Lowpass1 中，选择【DesignGuide】→【Filter】命令，弹出【Filter】对话框，选择【Filter Control Window】项，如图 6.97 所示。

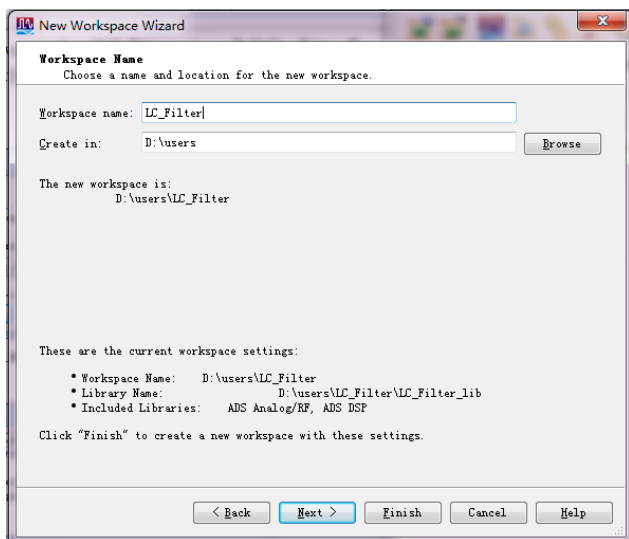


图 6.96 创建集总参数滤波器项目

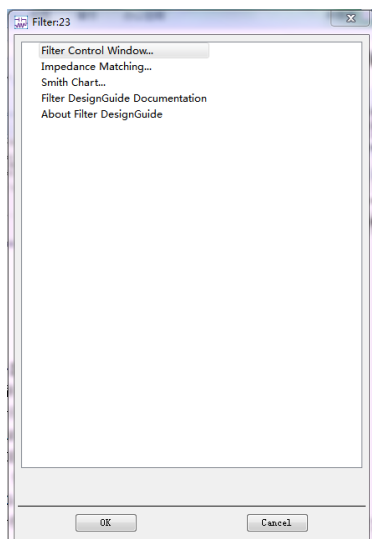


图 6.97 【Filter】对话框



(2) 单击【Filter】对话框中的【OK】按钮，关闭【Filter】对话框，同时将弹出滤波器设计向导初始【Filter DesignGuide】窗口，如图 6.98 所示。

(3) 在图 6.98 所示的【Filter DesignGuide】窗口中，单击工具栏中的【Component Palette-All】按钮，在 Filter Lowpass1 原理图中出现【Filter DG-All】列表下的元件面板，如图 6.99 所示，【Filter DG-All】元件面板上列出了各种类型滤波器的设计向导，包括集总元件低通、高通、带通和带阻滤波器设计向导。

(4) 在【Filter DG-All】元件面板上，选择双端口低通滤波器，插入原理图的画图区。原理图中的双端口低通滤波器如图 6.100 所示。

(5) 重新回到【Filter DesignGuide】窗口，单击【Filter Assistant】按钮，在【Filter DesignGuide】窗口中出现滤波器设计向导，如图 6.101 所示，将【Smart Component】项设为“DA\_CLowpassDT1”，说明 Filter\_Lowpass1 原理图中现在出现了快捷元件 DA\_LCLowpassDT1，设计向导就是用来设计原理图中的快捷元件 DA\_LCLowpassDT1。

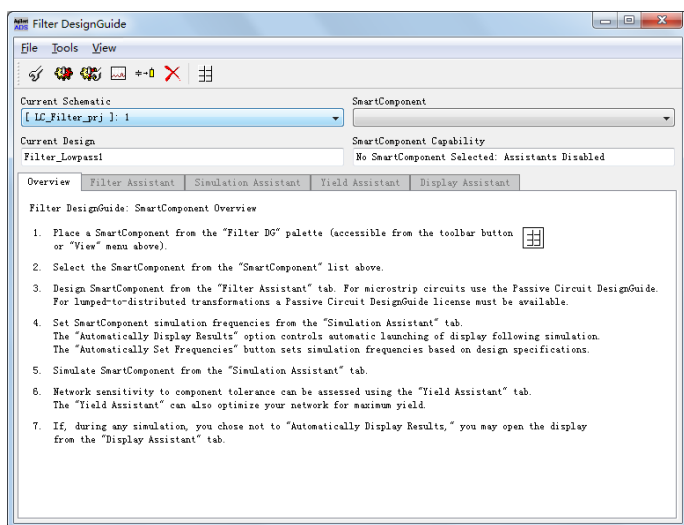


图 6.98 滤波器设计向导初始窗口

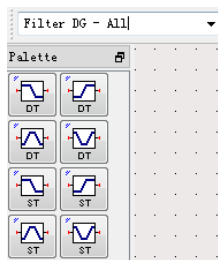


图 6.99 滤波器设计向导元件面板

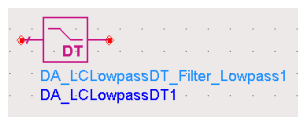


图 6.100 双端口低通滤波器原理图

下面对图 6.101 中【Filter DesignGuide】窗口的参量介绍如下。

① Source Impedances 为源阻抗，源阻抗的默认状态为 50Ω。

② Load Impedances 为负载阻抗，负载阻抗的默认状态为 50Ω。

③ First Element 为滤波器第一个元件的串并联方式，Parallel 为并联方式，Series 为串联方式，软件的默认状态为 Parallel 并联方式。



④ Order (N) 为滤波器的阶数，滤波器的阶数与滤波器的元件数相同。

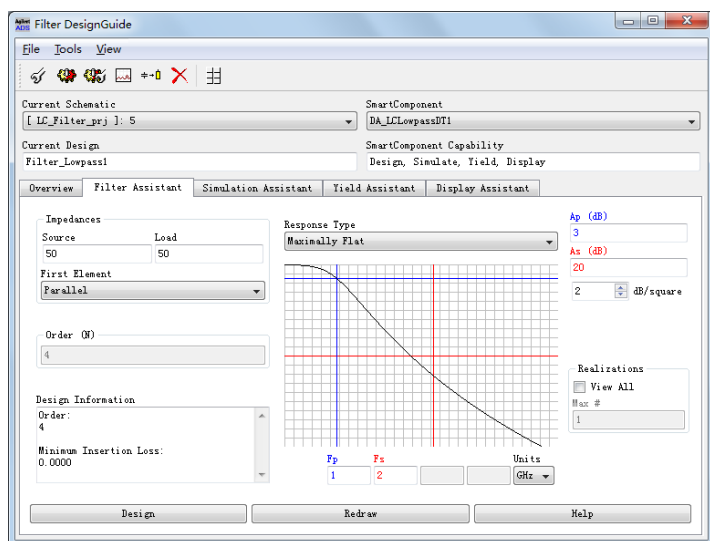


图 6.101 滤波器设计向导中的设计选项

⑤ Response Type 为滤波器响应的方式，滤波器响应的方式有最大平滑 Maximally Flat(也称为巴特沃兹)、切比雪夫 Chebyshev、椭圆 Elliptic 和高斯 Gaussian 等，软件默认的滤波器响应方式为最大平滑 Maximally Flat。

⑥ Ap (dB) 为滤波器通带的衰减。

⑦ As (dB) 为滤波器阻带的衰减。

⑧ Fp 为滤波器通带的频率。

⑨ Fs 为滤波器阻带的频率。

(6) 图 6.101 是初始状态，下面设置图 6.101 中快捷元件 DA\_LCLowpassDT1 的参数。

① Response Type 选为切比雪夫 Chebyshev。

② Ap (dB) 选为 0.5。

③ As (dB) 选为 40。

④ Fp 选为 0.1GHz。

⑤ Fs 选为 0.2GHz。

⑥ 其余选项保持默认状态。

单击【Filter DesignGuide】窗口中的【Design】按钮，软件中的设计向导完成设计。

(7) 现在观察【Filter DesignGuide】窗口，可以看到现在窗口中的曲线已经改变为图 6.102。

由图 6.102 可以看出，在通带内滤波器的响应是等幅值的波纹，在阻带内滤波器的衰减随着频率的升高单调上升，这是切比雪夫低通滤波器。

(8) 现在原理图中的 DA\_LCLowpassDT1 元件已经有了子电路，下面观察子电路，观察子电路的步骤如下。

① 在原理图中选中 DA\_LCLowpassDT1 元件。

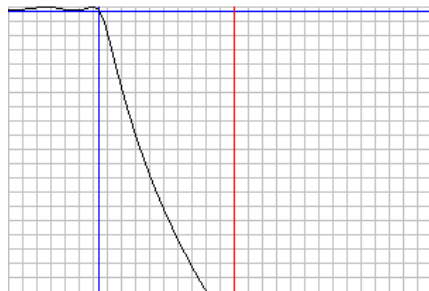



图 6.102 滤波器设计向导中符合指标的响应

② 然后单击原理图工具栏中的  按钮, 进入 DA\_LCLowpassDT1 元件子电路, DA\_LCLowpassDT1 元件子电路如图 6.103 所示。

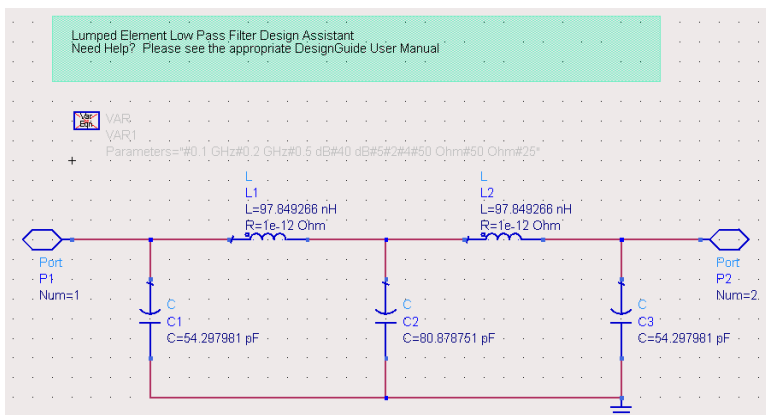



图 6.103 滤波器子电路

由图 6.103 可以看出, 满足技术指标的滤波器阶数为 5, 也就是滤波器有 5 个元件。


(9) 在原理图的工具栏中, 单击  按钮, 由 DA\_LCLowpassDT1 元件子电路退出, 回到图 6.100 所示的原理图中。


#### 4. 观察原理图的仿真结果

下面在原理图 Filter\_Lowpass1 中设置仿真控件, 来观察 DA\_LCLowpassDT1 元件的 S 参数, DA\_LCLowpassDT1 元件的子电路为集总参数低通滤波器。

(1) 打开 Filter\_Lowpass1 原理图。

(2) 在原理图 Filter\_Lowpass1 上选择 S 参数仿真元件面板, 在元件面板上选择负载终端 Term, 将负载终端 Term 两次插入原理图中, 定义负载终端 Term1 为输入端口, 负载终端 Term2 为输出端口。


(3) 在原理图工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 两次插入原理图, 让两个负载终端 Term 接地。

(4) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的负载终端 Term 和低通滤波器连接起来, 连接方式如图 6.104 所示。

(5) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控件 SP 插入原理图的画图区, 对 S 参数仿真控件设置如下。

- ① 频率扫描类型选为线性 Linear。
- ② 频率扫描的起始值设为 0MHz。
- ③ 频率扫描的终止值设为 300MHz。
- ④ 频率扫描的步长设为 10MHz。
- ⑤ 其余的参数保持默认状态。

单击 S 参数仿真控件设置窗口中的【OK】按钮, 完成对 S 参数仿真控件的设置, 现在用于仿真的集总参数低通滤波器原理图如图 6.105 所示。

(6) 现在可以对如图 6.105 所示的原理图仿真了。在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。

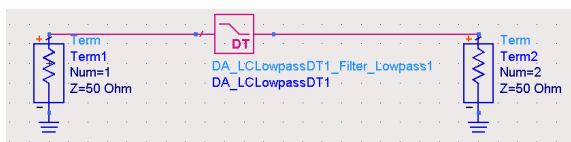


图 6.104 带有负载终端的低通滤波器原理图

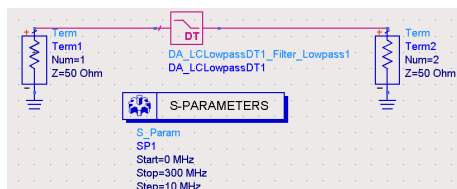


图 6.105 用于仿真的集总参数低通滤波器原理图

(7) 数据显示视窗的初始状态没有任何数据显示，用户自己选择需要显示的数据和数据显示的方式，这里选择的步骤如下。

- ① 在数据显示视窗中，单击数据显示方式面板中的矩形图标，插入数据显示区。
- ② 选择矩形图的横轴为频率，纵轴为用分贝（dB）表示的 S21。
- ③ 在 S21 曲线上插入 3 个 Marker，S21 曲线如图 6.106 所示，S21 表示信号由端口 1 到端口 2 的正向传输系数。

图 6.106 所示，S21 表示信号由端口 1 到端口 2 的正向传输系数。

- ④ 单击工具栏中的【保存】按钮，保存数据。

(8) 由图 6.106 可以看出，S21 曲线在 30MHz、100MHz 和 200MHz 处的值如下。

- ① 30MHz 处，S21 的值为 -0.499dB。
- ② 100MHz 处，S21 的值为 -0.500dB。
- ③ 200MHz 处，S21 的值为 -42.039dB。

图中的参数满足指标要求。

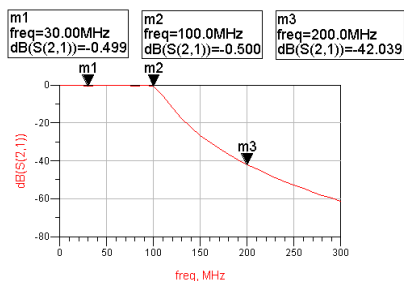


图 6.106 低通滤波器数据显示

## 6.5.2 设计集总参数低通滤波器

由上节 ADS 的设计向导，我们得到了集总参数低通滤波器原理图的基本结构，本节学习如何实现集总参数低通滤波器的原理图。实际的集总参数低通滤波器，集总参数元件之间需要有传输线连接，由于分布参数的影响，传输线会对滤波器的技术指标有影响，因此需要考虑加入传输线后滤波器的设计情况。

集总参数低通滤波器的设计指标如下。

- 设计集总参数低通滤波器。
- 通带频率范围为 0.1GHz 内。
- 通带内衰减小于 0.6dB。
- 在 0.2GHz 时衰减大于 40dB。
- 特性阻抗为 50Ω。
- 微带线基板的厚度为 1mm，基板的相对介电常数为 4.2。
- 连接集总参数元件的微带线，长选为 2.5mm，宽选为 1.5mm。

### 1. 创建新设计

创建一个新设计 Filter\_Lowpass2，这个设计依旧保存在 LC\_Filter 项目之中。创建新设计的步骤如下。

(1) 选择主视窗中【View】→【Startup Directory】命令，然后在主视窗中的文件浏览区选择 LC\_Filter\_prj，双击进入 LC\_Filter 项目。

(2) 在主视窗中选择【File】→【New Design】命令, 弹出【New Design】对话框, 在【New Design】对话框中, 输入新建的设计名称 Filter\_Lowpass2, 并选择对话框中【Create New Design in】项中的 New Schematic Window(新建原理图视窗), 以及选择【Schematic Design Templates】(原理图设计模板)项中的 none, 然后单击【OK】按钮, 新建的原理图 Filter\_Lowpass2 自动打开。

## 2. 设计原理图

在 Filter\_Lowpass2 原理图上, 根据图 6.103 搭建低通滤波器原理图电路。由于低通滤波器在微带线上搭建, 电感和电容元件之间需要有一定的间距, 因此电感和电容之间需要由微带线连接。

### (1) 设置微带线参数。

在原理图的元件面板列表上, 选择微带线【Mines-Microstrip】, 元件面板上出现与微带线对应的元件图标, 如图 6.107 所示。

在图 6.107 所示的微带线元件面板上, 选择 MSUB 插入原理图的画图区。在画图区中, 双击【MSub】, 弹出【Microstrip Substrate】设置对话框, 在【Microstrip Substrate】设置对话框中, 对微带线参数设置如下。

- ①  $H=1\text{mm}$ , 表示微带线基板的厚度为  $1\text{mm}$ 。
- ②  $\text{Er}=4.2$ , 表示微带线基板的相对介电常数为  $4.2$ 。
- ③  $\text{Mur}=1$ , 表示微带线的相对磁导率为  $1$ 。
- ④  $\text{Cond}=4.1\text{E}+7$ , 表示微带线导体的电导率为  $4.1\text{E}+7$ 。
- ⑤  $\text{Hu}=1.0\text{e}+033\text{mm}$ , 表示微带线的封装高度为  $1.0\text{e}+033\text{mm}$ 。
- ⑥  $T=0.05\text{mm}$ , 表示微带线的导体层厚度为  $0.05\text{mm}$ 。
- ⑦  $\text{TanD}=0.0003$ , 表示微带线的损耗角正切为  $0.0003$ 。
- ⑧  $\text{Rough}=0\text{mm}$ , 表示微带线表面粗糙度为  $0\text{mm}$ 。

完成设置的微带线 MSUB 控件如图 6.108 所示。

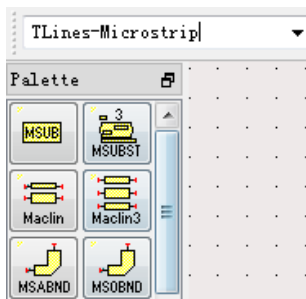


图 6.107 微带线元件面板

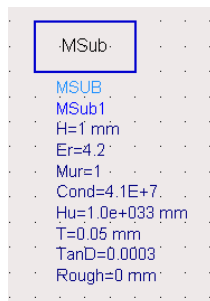



图 6.108 微带线参数设置

(2) 在 6.107 所示的微带线元件面板上, 选择 MTEE 插入原理图的画图区, MTEE 是微带线的 T 形结, 可以将电路由一路分为两路, T 形结的宽度分别用  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  表示。双击画图区的 MTEE, 在弹出的设置窗口中设置  $W_1=1.5\text{mm}$ 、 $W_2=1.5\text{mm}$  和  $W_3=1.5\text{mm}$ 。

(3) 在微带线元件面板上选择 MLIN, 3 次插入原理图的画图区, MLIN 是一段长度的微带线, 可以设置这段微带线的宽度  $W$  和长度  $L$ 。分别双击画图区的 3 个 MLIN, 将它们的数值都设置为  $W=1.5\text{mm}$  和  $L=2.5\text{mm}$ 。

(4) 单击工具栏中的  按钮，将前面的 1 个 MTEE 和 3 个 MLIN 连接起来，连接方式如图 6.109 所示。

(5) 在原理图的元件面板列表上，选择集总参数元件【Lumped-Components】，元件面板上出现与集总参数元件对应的元件图标，如图 6.110 所示。

(6) 在图 6.110 所示的集总参数元件面板上，分别选择电感 L 和电容 C 插入原理图的画图区。分别双击画图区的电感 L 和电容 C，打开电感 L 和电容 C 的设置对话框，将电感 L 和电容 C 的数值分别设置为  $L=97.849\text{nH}$  和  $C=54.298\text{pF}$ 。

(7) 在微带线元件面板上选择 MLIN，插入原理图的画图区，将它的数值设置为  $W=1.5\text{mm}$  和  $L=2.5\text{mm}$ 。单击工具栏中的  按钮，将该 MLIN 接地。

(8) 将电感和电容与微带线连接起来，连接方式如图 6.111 所示。低通滤波器由 5 个元件构成，图 6.111 为 5 元件滤波器中的 2 元件连接图。

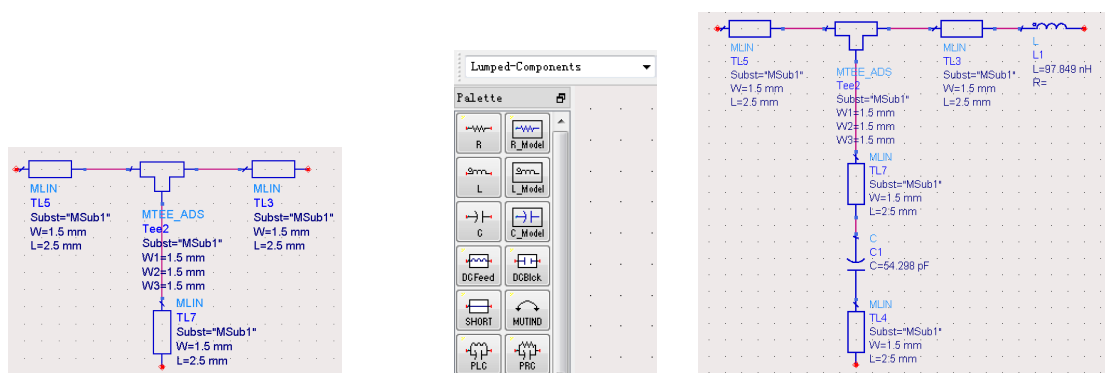


图 6.109 1 个 MTEE 和 3 个 MLIN 连接 图 6.110 集中参数元件面板 图 6.111 5 元件滤波器中的 2 元件连接图

(9) 用与上面相同的方法，将低通滤波器的其余 3 个元件插入画图区，并同样采用微带线的 T 形结和微带线 MLIN 连接电感和电容，5 个元件的低通滤波器如图 6.112 所示。

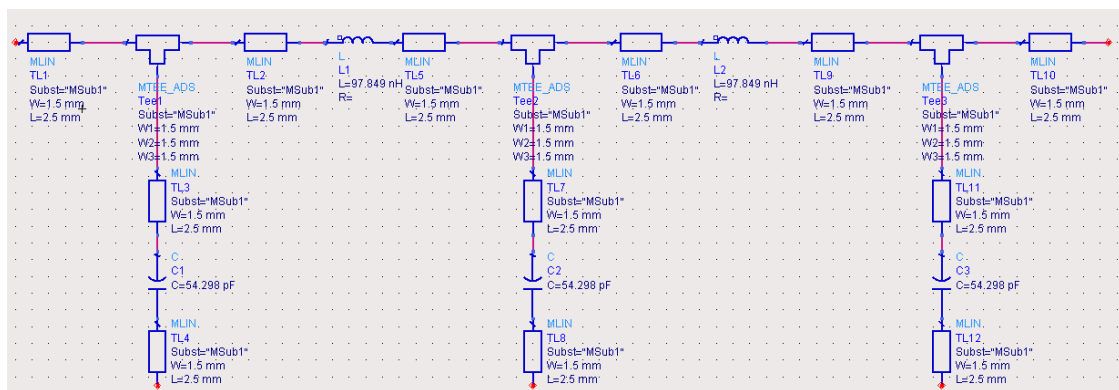


图 6.112 5 元件滤波器中的 2 元件连接图

在图 6.112 中，所有电感和电容的取值如下。

- $C1=54.298\text{pF}$
- $L1=97.849\text{nH}$
- $C2=80.879\text{pF}$


- $L2=97.849\text{nH}$
- $C3=54.298\text{pF}$


在图 6.112 中, 所有 T 形结 MTEE 的设置如下。

- $W1=1.5\text{mm}$
- $W2=1.5\text{mm}$
- $W3=1.5\text{mm}$

在图 6.112 中, 所有微带线 MLIN 的设置如下。

- $W=1.5\text{mm}$
- $L=2.5\text{mm}$

(10) 选择 S 参数仿真元件面板, 在元件面板上选择负载终端 Term, 两次插入原理图中, 定义负载终端 Term1 为输入端口, 负载终端 Term2 为输出端口。在原理图工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 两次插入原理图, 让负载终端 Term 接地。

单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的负载终端 Term 和低通滤波器连接起来, 连接方式如图 6.113 所示。

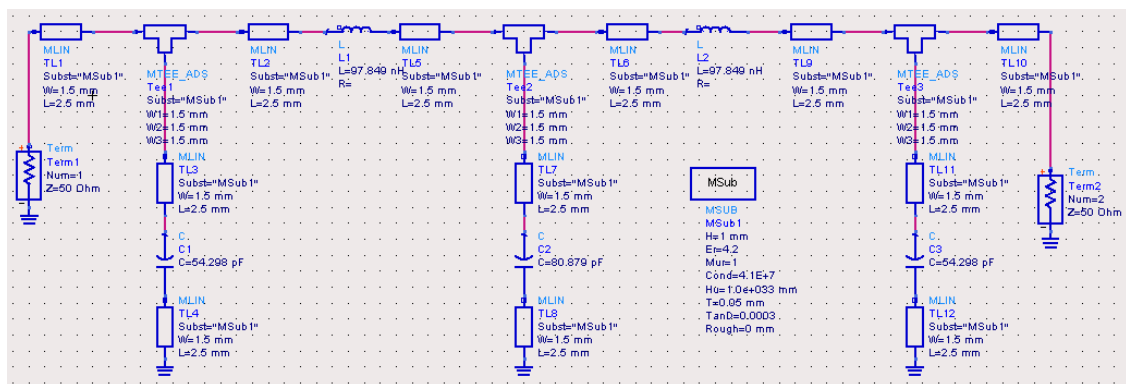


图 6.113 带有终端负载的低通滤波器原理图


### 3. 原理图仿真与调谐

在仿真之前, 首先设置 S 参数仿真控件 SP, SP 对原理图中的仿真参量给出取值范围, 当 S 参数仿真控件 SP 确定后, 就可以仿真了。

(1) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控件 SP, 插入原理图的画图区, 对 S 参数仿真控件 SP 设置如下。


- ① 频率扫描类型选为线性 Linear。
- ② 频率扫描的起始值设为 0MHz。
- ③ 频率扫描的终止值设为 300MHz。
- ④ 频率扫描的步长设为 10MHz。
- ⑤ 其余的参数保持默认状态。

单击 S 参数仿真控件设置窗口中的【OK】按钮, 完成对 S 参数仿真控件的设置, S 参数仿真控件 SP 如图 6.114 所示。

(2) 现在可以对原理图仿真了。在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。

(3) 数据显示视窗的初始状态没有任何数据显示, 用户自己选择需要显示的数据和数据显示的方式, 这里选择的步骤如下。

- ① 在数据显示视窗中, 单击数据显示方式面板中的矩形图标, 插入数据显示区。
- ② 选择矩形图的横轴为频率, 纵轴为用分贝 (dB) 表示的  $S_{21}$ 。
- ③ 在  $S_{21}$  曲线上插入 3 个 marker,  $S_{21}$  曲线如图 6.115 所示。
- ④ 在 30MHz 处,  $S_{21}$  的值为  $-0.492\text{dB}$ 。
- ⑤ 在 100MHz 处,  $S_{21}$  的值为  $-1.876\text{dB}$ 。
- ⑥ 在 200MHz 处,  $S_{21}$  的值为  $-47.524\text{dB}$ 。

比较图 6.115 与图 6.106 可以看出, 在原理图中添加微带线后,  $S_{21}$  曲线发生变化, 这是由于微带线产生了相移和衰减, 但由于低通滤波器的通带频率较低,  $S_{21}$  曲线变化不大。单击工具栏中的  按钮, 保存数据。

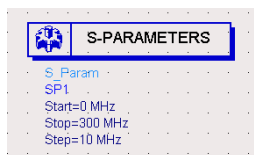


图 6.114 S 参数仿真控件

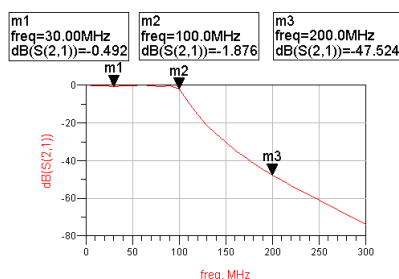


图 6.115 低通滤波器数据显示

(4) 图 6.115 与图 6.106 的曲线有差异, 图 6.106 的曲线在 100MHz 时不满足技术指标, 需要调整原理图。下面采用调谐来改变电感和电容的取值, 以期达到合格的曲线。按下键盘中的【Shift】键, 同时用鼠标分别选中原理图中的电感 L1、电容 C2 和电感 L2, 然后释放【Shift】键, 这时原理图中的电感 L1、电容 C2 和电感 L2 颜色发生改变, 如图 6.116 所示。

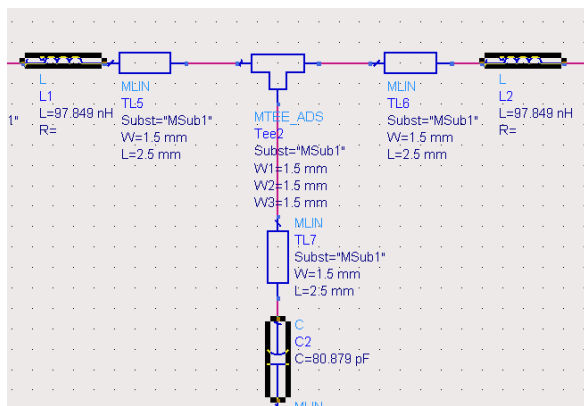




图 6.116 在原理图中选中电感 L1、电容 C2 和电感 L2

(5) 单击工具栏中的  按钮, 对电路调谐进行设置并调谐。单击  按钮, 同时弹出 3 个窗口, 这 3 个窗口分别是参数调谐窗口、仿真状态窗口和数据显示窗口, 其中数据显示窗口与图 6.115 完全一样, 这是因为原理图中的两个电感和一个电容还都是初始值, 没有被调谐。参数调谐窗口如图 6.117 所示。



(6) 在图 6.117 所示的参数调谐窗口, 保持默认设置状态, 然后单击原理图中的电感 L1, 弹出【Instance Tune Parameters】对话框, 在该对话框中选中【L】复选框, 如图 6.118 所示。

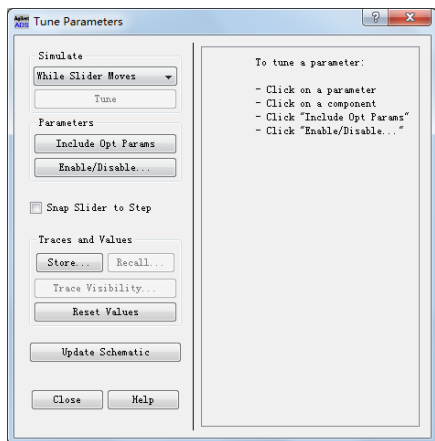


图 6.117 调谐窗口的初始状态

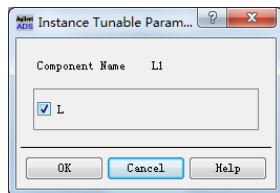


图 6.118 调谐元件选择窗口

(7) 单击【OK】按钮, 关闭该窗口, 同时调谐窗口中出现电感 L1 的调谐范围, 调谐的各参数含义如下。


- ① Value 值。该值开始时是原理图中电感的初始值, 当调谐开始后, 为电感调谐后的值。
- ② Max 值。该值是电感调谐的最大值。
- ③ Min 值。该值是电感调谐的最小值。
- ④ Step 值。该值是电感调谐的间隔。

上述参数中, Max、Min 和 Step 值可以更改范围。

(8) 用同样的方法, 让电感 L2 和电容 C2 的调谐范围也出现在调谐窗口中, 也就是说电感 L1、电容 C2 和电感 L2 三个元件都将调谐, 如图 6.119 所示。

(9) 在调谐窗口中, 保持 Max、Min 和 Step 数值的默认状态, 然后手动调节电感 L1、电容 C2 和电感 L2 的数值滚动条, 更改它们的数值, 可以看到调谐窗口【Tune Parameters】中的 Value 值在不断变化, 同时数据显示视窗中的 S21 图形也在不断变化。

(10) 通过调谐电感 L1、电容 C2 和电感 L2 的值, 使 S21 的曲线达到满意结果后, 单击调谐窗口中的【Update Schematic】按钮, 然后单击【Close】按钮, 关闭调谐窗口。

(11) 单击数据显示视窗中的  按钮, 保存调谐后的曲线, 这时数据显示视窗中的曲线如图 6.120 所示, 在 3 个 marker 处, S21 的值如下。

- ① 在 30MHz 处, S21 的值为-0.498dB。
- ② 在 100MHz 处, S21 的值为-0.181dB。
- ③ 在 200MHz 处, S21 的值为-45.282dB。

由图 6.120 可以看出, 曲线满足技术指标。

(12) 这时原理图中的电感 L1、电容 C2 和电感 L2 已经更新为调谐后的值, 电感 L1、电容 C2 和电感 L2 值如下。

- L1=97.879nH。
- C2=74.4086pF。
- L2=87.0856nH。



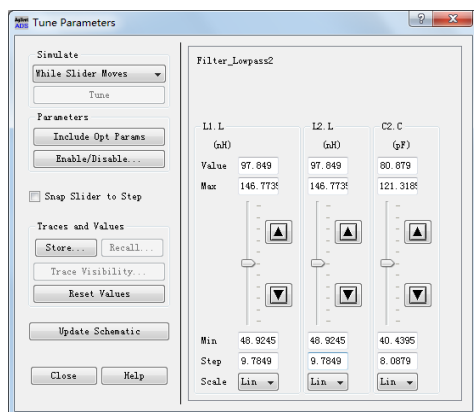


图 6.119 带有三个元件调谐范围的调谐窗口

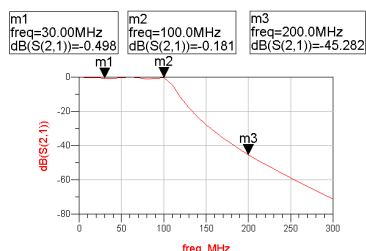


图 6.120 调谐后的曲线

## 6.6 功率放大器

在射频接收系统中，接收机前端需要放置低噪声放大器，本章介绍低噪声放大器的设计方法。设计放大器首先要选择适当的晶体管，在选择有了特定参量的晶体管后，放大器主要通过设计输入/输出匹配网络来实现。

本节首先介绍低噪声放大器的理论基础，然后用 ADS 软件设计一个低噪声放大器，并对放大器的各种参数进行仿真，最后通过优化得到符合技术指标的低噪声放大器。

### 6.6.1 放大器的基本原理

#### 1. 稳定性

设计射频放大器时，必须考虑电路的稳定性，这一点与低频电路的设计方法完全不同。由于反射波的存在，射频放大器在某些工作频率或终端条件下有产生振荡的倾向，不再发挥放大器的作用，因此必须分析射频放大器的稳定性，稳定性是指放大器抑制环境的变化（如信号频率、温度、源和负载等变化时），维持正常工作特性的能力。

##### (1) 放大器稳定的定义

放大器的二端口网络如图 6.121 所示，图中传输线上有反射波传输，源的反射系数  $\Gamma_s$ ，负载的反射系数为  $\Gamma_L$ ，二端口网络输入端的反射系数为  $\Gamma_{in}$ ，二端口网络输出端的反射系数为  $\Gamma_{out}$ 。如果反射系数的模大于 1，传输线上反射波的振幅将比入射波的振幅大，这将导致不稳定产生。因此，放大器稳定意味着反射系数的模小于 1，即：

$$|\Gamma_s| < 1, |\Gamma_L| < 1, |\Gamma_{in}| < 1, |\Gamma_{out}| < 1$$

##### (2) 放大器稳定性判别的图解法

$\Gamma_L$ 、 $\Gamma_s$  和  $S$  参量对放大器的稳定性有影响，可以在  $\Gamma_L$  和  $\Gamma_s$  的复平面上讨论稳定区域，用图解的方法给出稳定区域。在  $\Gamma_L$  的复平面上讨论稳定区域，称为输出稳定判别圆，输出稳定判别圆给出复平面上稳定与不稳定的边界。在  $\Gamma_s$  的复平面上讨论稳定区域，称为输入稳定判别圆，输入稳定判别圆给出了  $\Gamma_s$  复平面上稳定与不稳定的边界。

绝对稳定是稳定的一个特例，绝对稳定是指在频率等特定的条件下，放大器在  $\Gamma_L$  和  $\Gamma_s$  的

整个史密斯圆图内，都处于稳定状态。当放大器绝对稳定时，稳定判别圆与史密斯圆图的相对位置如图 6.122 所示。

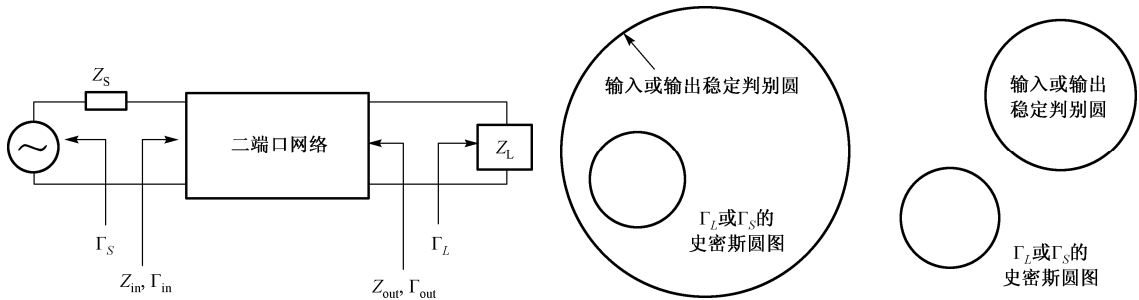


图 6.121 接有源和负载的放大器二端口网络

图 6.122 绝对稳定时稳定判别圆与史密斯圆图的相对位置

### (3) 放大器绝对稳定判别的解析法

还可以用解析法判别放大器的稳定性。

$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} > 1$$

式中， $k$  称为稳定性因子。

绝对稳定要求：

$$k > 1, \quad |\Delta| < 1$$

## 2. 放大器功率增益

### 1) 转换功率增益

对输入信号进行放大，是放大器最重要的任务，因此在放大器的设计中，增益的概念很重要。放大器的转换功率增益为：

$$G_T = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - \Gamma_{in}\Gamma_S|^2} |S_{21}|^2 \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$$

有如下结论。

(1)  $G_0 = |S_{21}|^2$ ，可以视该项为晶体管的增益。

(2)  $G_S = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{|1 - \Gamma_{in}\Gamma_S|^2}$ ，可以视该项为输入匹配网络的有效增益。

(3)  $G_L = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_L|^2}$ ，可以视该项为输出匹配网络的有效增益。

### 2) 等增益圆

若增益  $G_S$  为固定值，这对  $\Gamma_S$  的取值有要求。同样，若增益  $G_L$  为固定值，则对  $\Gamma_L$  的取值有要求。可以在  $\Gamma_S$  复平面上找出等增益  $G_S$  的曲线，在复平面上找出等增益  $G_L$  的曲线，等增益  $G_S$  和等增益  $G_L$  的曲线都为圆。

### 3. 放大器驻波比

信源与晶体管之间及晶体管与负载之间的失配程度对驻波比有影响，在很多情况下，放大器的输入和输出电压驻波比必须保持在特定指标之下。

放大器输入、输出电压驻波比为：

$$\text{VSWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

### 4. 放大器噪声

对放大器来说，噪声的存在对整个设计有重要影响，在低噪声的前提下对信号进行放大是对放大器的基本要求。下面先介绍噪声的表示方法和级联网络的噪声特性，然后在史密斯圆图上画出等噪声系数圆。

#### 1) 噪声系数

(1) 在标准室温 ( $T_0 = 290\text{K}$ ) 下，若仅由输入端电阻在放大器输出端产生的热噪声为  $(P_{No})_i$ ，则放大器的噪声系数定义为放大器总输出噪声  $P_{No}$  与  $(P_{No})_i$  的比值，用  $F$  表示。

$$F = \frac{P_{No}}{(P_{No})_i}$$

(2) 噪声系数  $F$  还有另一种物理意义。

$$F = \frac{P_{Si} / P_{Ni}}{P_{So} / P_{No}}$$

$P_{Si} / P_{Ni}$  为放大器输入端的额定信噪比， $P_{So} / P_{No}$  为放大器输出端的额定信噪比，噪声系数  $F$  也可以由放大器输入端额定信噪比与输出端额定信噪比的比值来确定。

(3) 二端口放大器的噪声系数还可以表示为：

$$F = F_{\min} + \frac{R_n}{G_S} |Y_S - Y_{opt}|^2$$

式中：

$R_n$  表示晶体管的等效噪声电阻；

$Y_S = G_S + jB_S = \frac{1}{Z_0} \frac{1 - \Gamma_S}{1 + \Gamma_S}$  表示晶体管的源导纳；

$Y_{opt} = G_{opt} + jB_{opt}$  表示得出最小噪声系数的最佳源导纳；

$F_{\min}$  表示  $Y_S = Y_{opt}$  时晶体管的最小噪声系数。

#### 2) 级联网络的噪声系数

先考虑两个放大器的级联。两级放大器的总噪声系数  $F$  为：

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}}$$

上式表明，级联网络第一级的噪声系数  $F_1$  和增益  $G_{A1}$  对系统总噪声系数的影响大。

下面考虑  $n$  个放大器的级联，有如下关系：

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_{A1}} + \frac{F_3 - 1}{G_{A1}G_{A2}} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_{A1}G_{A2}\dots G_{An-1}}$$

多级级联的高增益放大器，仅第一级对总噪声有较大影响，而其他级对总噪声的影响很小。

### 3) 噪声系数圆

可以在  $\Gamma_S$  复平面上推导等噪声系数  $F$  曲线, 在  $\Gamma_S$  复平面上等噪声点在一个圆上, 该圆称为等噪声系数圆。

## 6.6.2 设计实现低噪声放大器

### 1. 设计指标

低噪声放大器的设计指标选取如下。

- (1) 低噪声放大器的中心频率选为 2.4GHz, 通带选为 8MHz。
- (2) 通带内的增益达到 11.5dB, 波纹小于 0.7dB。
- (3) 通带内的噪声系数小于 3。
- (4) 通带内为绝对稳定。
- (5) 通带内的输入驻波比小于 1.5。
- (6) 通带内的输出驻波比小于 2。
- (7) 系统特性阻抗选为  $50\Omega$ 。
- (8) 微带线基板的厚度选为 0.8mm, 基板的相对介电常数选为 4.3。

### 2. 晶体管仿真参数

本小节将在 ADS 元件库中选取晶体管, 并对晶体管的参数进行仿真。

#### 1) 创建项目

下面将创建一个低噪声放大器项目, 本章所有的设计都将保存在这个项目之中。创建项目的步骤如下。

- (1) 启动 ADS 软件, 弹出主视窗。

(2) 选择主视窗中【File】→【New Workspace】命令, 弹出【New Workspace Wizard】对话框, 在【New Workspace Wizard】对话框中, 输入项目名称, 这里项目名称定为 LNA32011, 如图 6.123 所示。

- (3) 单击【Finish】按钮, 完成创建项目, 同时一个未命名的原理图 (untitled1) 自动打开。
- (4) 关闭未命名的原理图 (untitled1)。

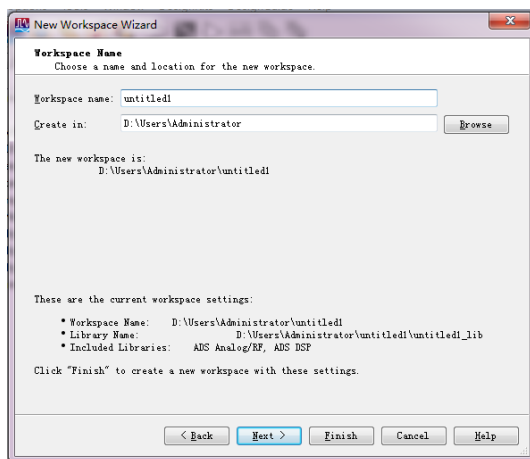


图 6.123 创建低噪声放大器项目

## 2) 创建原理图

在 LNA32011 项目中, 创建一个低噪声放大器晶体管工作点扫描的原理图, 这个原理图命名为 DC\_curve。创建原理图的方法很多, 这里创建新原理图的步骤如下。

(1) 在主视窗中选择【File】→【New Schematic】命令, 在弹出的【New Schematic】对话框中, 输入新建的原理图名称“DC\_curve”, 并选择【Schematic Design Templates】(原理图设计模板)项中的【BJT\_curve\_tracer】, 如图 6.124 所示。

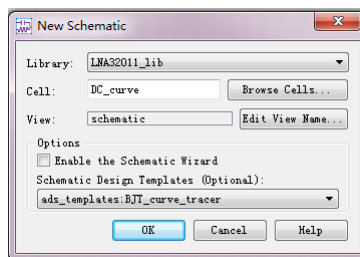


图 6.124 创建晶体管工作点扫描的原理图

(2) 单击【OK】按钮, 完成创建低噪声放大器晶体管工作点扫描的原理图, 新建的原理图 DC\_curve 自动打开。原理图 DC\_curve 是带有模板的, 模板为 BJT\_curve\_tracer, 带有这个模板的原理图可以自动完成晶体管工作点扫描的工作, 如图 6.125 所示。

## 3) 在 ADS 元件库中选取晶体管

在 ADS 软件的元件库中选取晶体管, ADS 软件的元件库中有多种晶体管, 经考察这里选取晶体管“32011”, 选取晶体管“32011”的步骤如下。

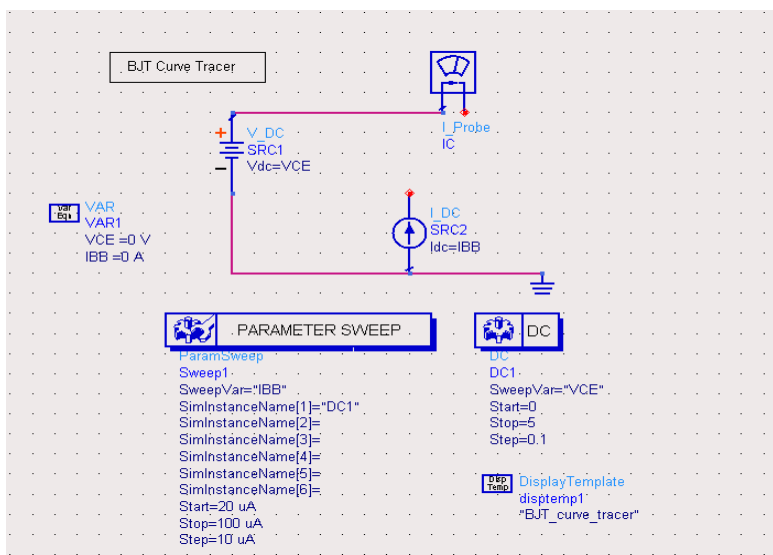



图 6.125 带有 BJT 晶体管工作点扫描模板的原理图

(1) 单击原理图工具栏中的  按钮, 打开元件库, 元件库窗口如图 6.126 示。

(2) 在元件库窗口中单击【Find Component(s)】按钮, 系统弹出元件搜索窗口, 元件搜索窗口如图 6.127 所示。

(3) 在元件搜索窗口输入元件名称“32011”, 然后单击【Apply】按钮查找, 查找结束后, 在元件库窗口可以看到这种晶体管的不同模型。

(4) “32011”元件中有以 sp 开头的元件和以 pb 开头的元件, 其中以 sp 开头的元件是 S 参数模型, 这种模型可以用来作 S 参数仿真, 但这种模型不能用来做直流工作点扫描, 以 pb 开头的元件是封装元件, 以 pb 开头的元件可以做直流工作点扫描。

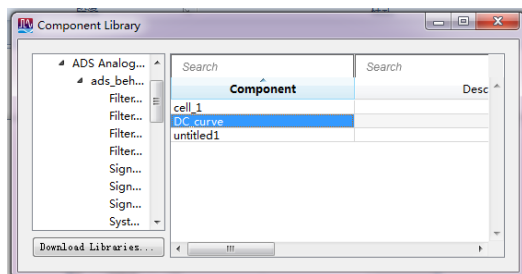


图 6.126 元件库窗口

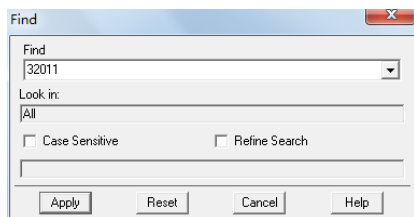


图 6.127 元件搜索窗口

(5) 选择以 pb 开头的元件 pb\_hp\_AT32011\_19950105 做直流工作点扫描, 选择以 sp 开头的元件 sp\_hp\_AT32011\_5\_19950105 做晶体管 S 参数扫描, 通过这两个元件了解该晶体管的参数, 并通过这两个元件设计仿真低噪声放大器。

#### 4) 晶体管静态工作点仿真

(1) 打开元件库, 找到“32011”元件, 单击其中的元件 pb\_hp\_AT32011\_19950105, 然后单击原理图画图区, 将元件 pb\_hp\_AT32011\_19950105 切换到原理图画图区。

(2) 将元件 pb\_hp\_AT32011\_19950105 放置在原理图中, 并与模板中的元件按图 6.128 所示的方式连接起来成晶体管工作点扫描的电路。

(3) 将参数扫描控制器 (Parameter Sweep) 中的【Start】项修改为 Start=0。

(4) 单击原理图工具栏中的 按钮, 执行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。

(5) 由于使用的是仿真模板, 需要的仿真结果已经自动出现在数据显示视窗中, 如图 6.129 所示, 这是 BJT 直流工作点扫描曲线。

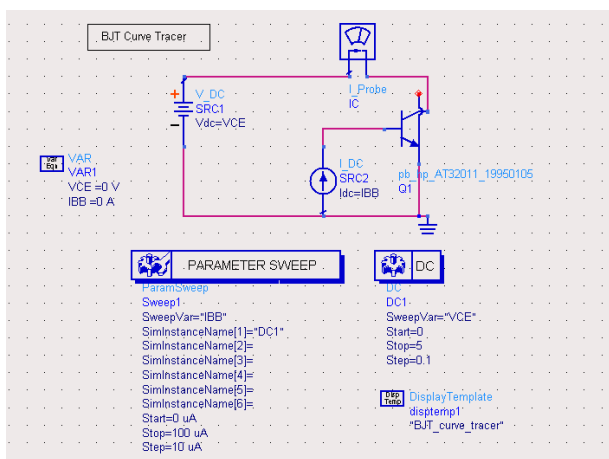


图 6.128 晶体管工作点扫描的电路

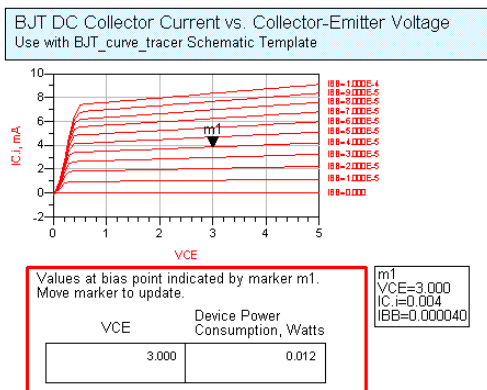



图 6.129 BJT 直流工作点扫描曲线

#### 5) 晶体管 S 参数扫描

重新创建一个新的原理图 S\_Params, 在这个原理图中进行晶体管的 S 参数扫描, 采用的晶体管为以 sp 开头的元件 sp\_hp\_AT32011\_5\_19950105。

(1) 在主视窗中选择【File】→【New Schematic】命令, 弹出【New Schematic】对话框。在【New Schematic】对话框中, 输入新建的原理图名称 S\_Params, 并选择【Schematic Design Templates】(原理图设计模板) 项中的 S\_Params, 完成创建晶体管 S 参数扫描的原理图。

(2) 晶体管 S 参数扫描的原理图是带有模板的, 模板为 S\_Params, 带有这个模板的原理图可以自动完成 S 参数仿真的工作, 如图 6.130 所示。

(3) 单击原理图工具栏中的  按钮, 打开元件库, 在元件库窗口中单击【Find Component (s)】按钮, 系统弹出元件搜索窗口, 在元件搜索窗口输入元件名称“32011”, 然后单击【Apply】按钮查找, 选择以 sp 开头的元件 sp\_hp\_AT32011\_5\_19950105 做晶体管 S 参数扫描。

(4) 将元件 sp\_hp\_AT32011\_5\_19950105 切换到原理图画图区, 并与模板中的元件按图 6.131 所示的方式连接起来成晶体 S 参数扫描的电路。

(5) 双击 S 参数仿真控件 SP, 将仿真控件修改如下。

- ① 频率扫描的起始值设为 0.1GHz。
- ② 频率扫描的终止值设为 5.1GHz。
- ③ 频率扫描的步长设为 0.01GHz。

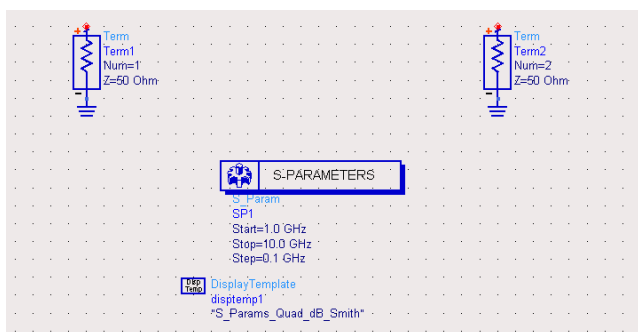


图 6.130 带有晶体管 S 参数扫描模板的原理图

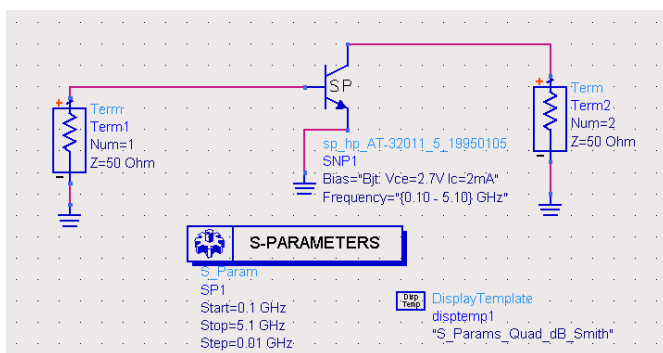



图 6.131 晶体管 S 参数扫描的电路

(6) 单击原理图工具栏中的  按钮, 执行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。

(7) 由于使用的是仿真模板, 需要的仿真结果已经自动出现在数据显示视窗中, 如图 6.132 所示, 图中给出了 4 个 S 参数的曲线。

(8) 双击 S 参数仿真控件 SP, 选中其中的【Calculate Noise】复选框, 如图 6.133 所示。

(9) 重新执行 S 参数仿真, 仿真后查看晶体管的噪声系数, 如图 6.134 所示。

晶体管选取总结

(1) 由上述分析可以看出, 晶体管参数指标如下。

- ① 晶体管 sp\_hp\_AT32011\_5\_19950105 的频率范围为 0.1~5.1GHz, 满足技术指标。

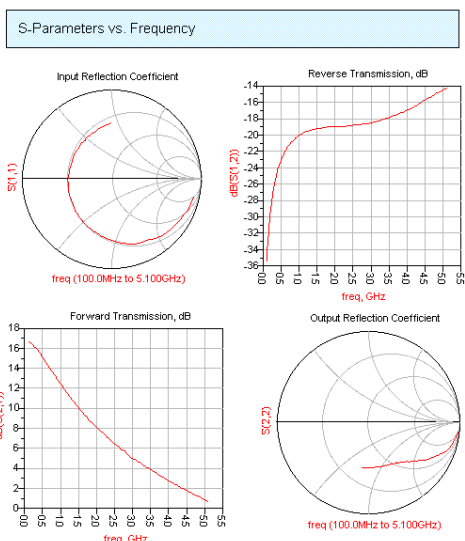


图 6.132 晶体管 S 参数仿真曲线

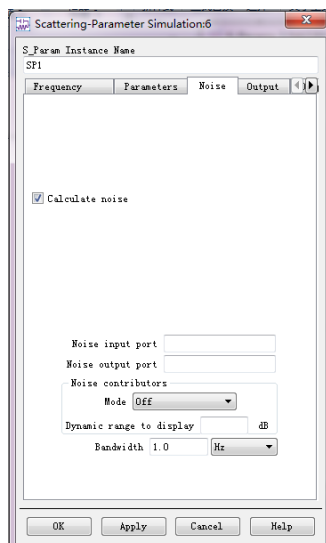
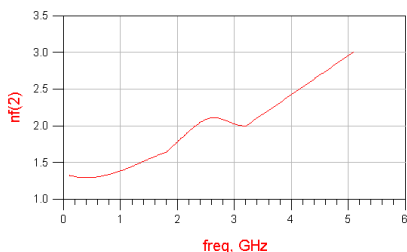


图 6.133 计算噪声选项

图 6.134 噪声系数  $nf(2)$  曲线

- ② 通带内的噪声系数满足技术指标。
- ③ 通带内的增益不满足技术指标。
- ④ 通带内的输入驻波比不满足技术指标。
- ⑤ 通带内的输出驻波比不满足技术指标。
- (2) 结论如下。

① 频率范围和噪声系数满足技术指标，可以选取该晶体管。

② 通带内增益、输入/输出驻波比不满足技术指标，需要添加输入/输出匹配网络，通过输入/输出匹配网络的优化实现该 3 项指标。

### 3. SP 模型

SP 模型的设计通常作为电路设计的初级阶段，在对封装模型设计前，通常先对 SP 模型进行设计，通过预先进行 SP 模型设计仿真，可以获得电路的大概指标，另外对 SP 模型进行设计不需要考虑偏置网络，只考虑射频信号即可。


本小节将利用 SP 模型元件 `sp_hp_AT32011_5_19950105` 设计低噪声放大器，通过添加输入/输出匹配网络实现设计目标。

#### 1) 创建原理图

下面将在 LNA32011\_wrk 项目中创建 SP 模型的原理图，创建原理图的方法很多，这里创建原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗，同时弹出【Advanced Design System】对话框，在【Advanced Design System】对话框中【Recently Workspaces】项的内容是前面曾经打开的低噪声放大器 LNA32011\_wrk 项目。


(2) 单击【Advanced Design System】对话框中的【Recently Workspaces】项，进入 LNA32011\_wrk 项目，这时主视窗的文件浏览区为 LNA32011\_wrk 项目下的文件夹。

(3) 在主视窗的工具栏中单击  按钮，弹出一个未命名的原理图 untitled1。在未命名的





原理图 untitled1 上, 选择菜单【File】→【Save Schematic】, 在弹出的【Save Schematic】对话框中输入文件名 S\_Params\_1, 将 SP 模型低噪声放大器的原理图命名为 S\_Params\_1。

## 2) 搭建原理图

(1) 单击原理图工具栏中的  按钮, 打开元件库, 在元件库窗口中单击【Find Component (s)】按钮, 在元件搜索窗口输入元件名称“32011”, 然后单击【Apply】按钮查找, 选择以 sp 开头的元件 sp\_hp\_AT32011\_5\_19950105 切换到原理图画图区。

(2) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择负载终端 Term, 2 次插入原理图中, 定义负载终端 Term1 为输入端口, 负载终端 Term2 为输出端口。

(3) 在原理图工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 3 次插入原理图, 让 2 个负载终端 Term 及晶体管发射极接地。

(4) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的两个负载终端 Term 和 SP 模型元件连接起来, 连接方式如图 6.135 所示。

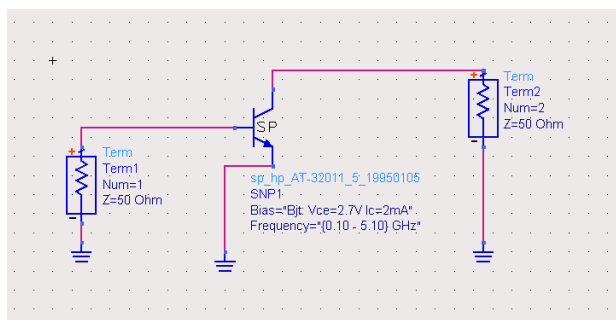


图 6.135 用于仿真 SP 模型元件参数的原理图

(5) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择输入阻抗测量控件 Zin 插入原理图中, 输入阻抗测量控件 Zin, 如图 6.136 所示。

(6) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控件 SP 插入原理图中, 将仿真控件的参数设置如下。

- ① 频率扫描的起始值设为 0.1GHz。
- ② 频率扫描的终止值设为 5.1GHz。
- ③ 频率扫描的步长设为 0.01GHz。

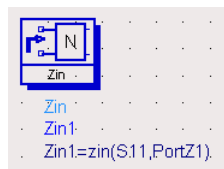



图 6.136 输入阻抗测量控件

(7) 单击原理图工具栏中的  按钮, 执行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。在数据显示视窗中, 单击数据显示方式面板中的数据列表图标, 插入数据显示区, 显示输入阻抗 Zin1 的数据, 如图 6.137 所示。

(8) 图 6.137 中输入阻抗 Zin1 的数据是用幅值和相角表示的, 需要将输入阻抗 Zin1 的数据改写为实部和虚部, 步骤如下。

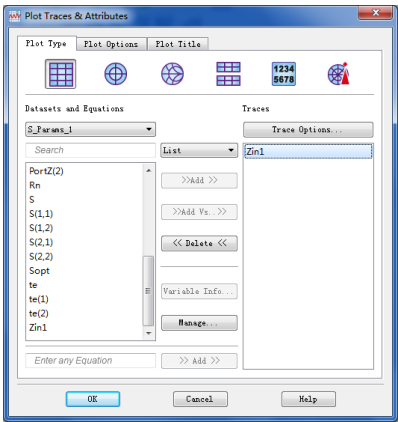
- ① 双击图 6.137 中的数据框, 弹出【Plot Trace & Attributes】对话框, 如图 6.138(a)所示。
- ② 在【Plot Trace & Attributes】对话框中, 双击 Zin1, 弹出【Trace Options】对话框, 选择【Real/Imaginary】项, 如图 6.138(b)所示。

(9) 用实部和虚部表示的输入阻抗 Zin1 数据, 如图 6.139 所示。

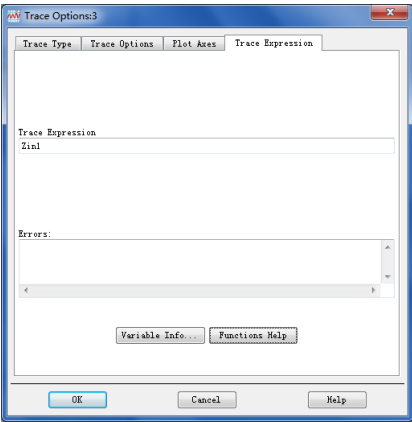
(10) 由图 6.139 可以看出, 在中心频率 2.4GHz 处, 输入阻抗  $Zin1 = 17.586 + j1.530$ 。

freq	Zin1
100.0 MHz	423.521 / -74.611
110.0 MHz	385.833 / -75.231
120.0 MHz	354.187 / -75.743
130.0 MHz	327.238 / -76.171
140.0 MHz	304.013 / -76.533
150.0 MHz	283.786 / -76.841
160.0 MHz	266.011 / -77.105
170.0 MHz	250.264 / -77.331
180.0 MHz	236.216 / -77.527
190.0 MHz	223.602 / -77.695
200.0 MHz	212.212 / -77.841
210.0 MHz	202.614 / -77.927
220.0 MHz	193.804 / -78.000
230.0 MHz	185.688 / -78.061
240.0 MHz	178.184 / -78.112
250.0 MHz	171.225 / -78.153
260.0 MHz	164.753 / -78.185
270.0 MHz	158.716 / -78.210
280.0 MHz	153.072 / -78.226
290.0 MHz	147.782 / -78.236
300.0 MHz	142.813 / -78.239
310.0 MHz	138.135 / -78.236
320.0 MHz	133.723 / -78.227
330.0 MHz	129.554 / -78.212
340.0 MHz	125.608 / -78.192
350.0 MHz	121.867 / -78.167
360.0 MHz	118.314 / -78.137
370.0 MHz	114.935 / -78.103
380.0 MHz	111.716 / -78.063
390.0 MHz	108.647 / -78.019

图 6.137 输入阻抗的数据



(a) 【Plot Trace & Attributes】对话框



(b) 【Trace Options】对话框

图 6.138 输入阻抗的数据改写为实部和虚部

freq	Zin1
2.200 GHz	17.143 - j1.927
2.210 GHz	17.138 - j1.773
2.220 GHz	17.134 - j1.618
2.230 GHz	17.131 - j1.464
2.240 GHz	17.127 - j1.310
2.250 GHz	17.124 - j1.156
2.260 GHz	17.122 - j1.002
2.270 GHz	17.120 - j0.848
2.280 GHz	17.118 - j0.693
2.290 GHz	17.116 - j0.539
2.300 GHz	17.115 - j0.385
2.310 GHz	17.158 - j0.192
2.320 GHz	17.204 - j2.699E-15
2.330 GHz	17.250 + j0.192
2.340 GHz	17.296 + j0.384
2.350 GHz	17.343 + j0.576
2.360 GHz	17.390 + j0.767
2.370 GHz	17.438 + j0.958
2.380 GHz	17.487 + j1.149
2.390 GHz	17.536 + j1.340
2.400 GHz	17.586 + j1.530
2.410 GHz	17.591 + j1.722
2.420 GHz	17.597 + j1.913
2.430 GHz	17.603 + j2.105
2.440 GHz	17.610 + j2.296
2.450 GHz	17.617 + j2.488
2.460 GHz	17.625 + j2.679
2.470 GHz	17.634 + j2.871
2.480 GHz	17.643 + j3.063
2.490 GHz	17.653 + j3.255
2.500 GHz	17.663 + j3.447
2.510 GHz	17.672 + j3.600
2.520 GHz	17.681 + j3.754
2.530 GHz	17.690 + j3.908
2.540 GHz	17.700 + j4.061
2.550 GHz	17.710 + j4.215

图 6.139 用实部和虚部表示的输入阻抗数据

### 3) 设计输入匹配网络

在 SP 模型的输入端采用单支节匹配网络进行匹配, 匹配的步骤如下。

(1) 在微带线元件面板上, 选择 MSUB 插入原理图 S\_Params\_1 的画图区。在画图区中双击 MSub, 弹出【Microstrip Substrate】设置对话框, 在【Microstrip Substrate】设置对话框中, 对微带线的参数设置如下。

- ①  $H=0.8\text{mm}$ , 表示微带线基板的厚度为  $0.8\text{mm}$ 。
- ②  $\text{Er}=4.3$ , 表示微带线基板的相对介电常数为  $4.3$ 。
- ③  $\text{Mur}=1$ , 表示微带线的相对磁导率为  $1$ 。
- ④  $\text{Cond}=5.88\text{E}+7$ , 表示微带线导体的电导率为  $5.88\text{E}+7$ 。
- ⑤  $\text{Hu}=1.0\text{e}+033\text{mm}$ , 表示微带线的封装高度为  $1.0\text{e}+033\text{mm}$ 。
- ⑥  $T=0.03\text{mm}$ , 表示微带线的导体层厚度为  $0.03\text{mm}$ 。
- ⑦  $\text{TanD}=0.001$ , 表示微带线的损耗角正切为  $0.001$ 。
- ⑧  $\text{Rough}=0\text{mm}$ , 表示微带线表面粗糙度为  $0\text{mm}$ 。

完成设置的微带线 MSUB 控件如图 6.140 所示。

(2) 在原理图的元件面板列表上, 选择无源匹配网络设计向导【Passive Circuit DG-Matching】, 元件面板上出现与无源匹配网络设计向导对应的元件图标。

(3) 在无源匹配网络设计向导元件面板上, 选择单支节匹配网络 SSMtch 插入原理图的画图区, 对单支节匹配网络 SSMtch 设置如下。

- ①  $\text{Subst}=\text{"MSub1"}$ , 表示单支节匹配网络采用微带线 MSUB1 控件。
- ②  $F=2.4\text{GHz}$ , 表示单支节匹配网络选取的中心频率为  $2.4\text{GHz}$ 。
- ③  $Z_{\text{in}}=50\Omega$ , 表示匹配的目标为输入阻抗达到  $50\Omega$ 。
- ④  $Z_{\text{load}}=(17.586+j*1.530)\Omega$ , 这是前面计算出来的输入阻抗。
- ⑤  $Z_{\text{stub}}=50\Omega$ , 表示支节的特性阻抗为  $50\Omega$ 。
- ⑥  $Z_{\text{line}}=50\Omega$ , 表示传输线的特性阻抗为  $50\Omega$ 。

完成设置的单支节匹配网络 SSMtch 如图 6.141 所示。

(4) 单击原理图中的单支节匹配网络 SSMtch, 然后选择菜单栏中的设计向导【Design Guide】→【Passive Circuit】命令, 在弹出的如图 6.142 所示的【Passive Circuit】对话框中选择【Microstrip Control Window】项。

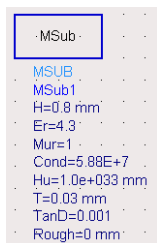


图 6.140 微带线参数设置

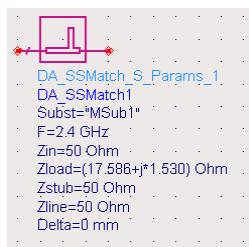


图 6.141 单支节匹配网络 SSMtch

(5) 单击【OK】按钮, 关闭【Passive Circuit】对话框, 同时将弹出设计向导【Passive Circuit Design Guide】窗口, 如图 6.143 所示。

(6) 选择【Design Assistant】选项卡, 并单击【Design】按钮, 软件将自动完成单支节匹配网络的设计过程。



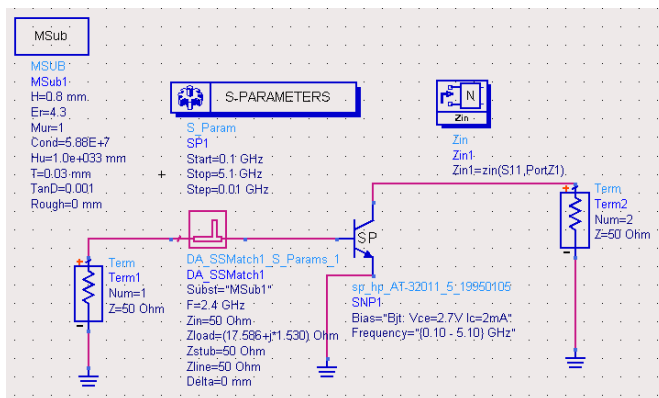


图 6.145 带有单支节匹配网络的原理图

② 分别在 S11、S12、S21 和 S22 曲线的中心频率上各插入一个 marker。

③ S11、S12、S21 和 S22 曲线如图 6.146 所示，单击工具栏中的【保存】按钮，保存数据。

(11) 由图 6.146 可以看出，S11、S12、S21 和 S22 曲线在中心频率处的参数如下。

① S11 曲线在中心频率处的值为  $-30.541\text{dB}$ ，表明输入端匹配良好。

② S22 曲线在中心频率处的值为  $-3.322\text{dB}$ ，表明输出端匹配不好。

③ S21 曲线在中心频率处的值为  $7.881\text{dB}$ ，表明增益没有达到技术指标。

4) 设计优化匹配电路

图 6.146 可以看出，只添加输入匹配网络不能满足技术指标，下面同时添加输入/输出匹配网络，并对输入/输出匹配网络进行优化，以达到技术指标。

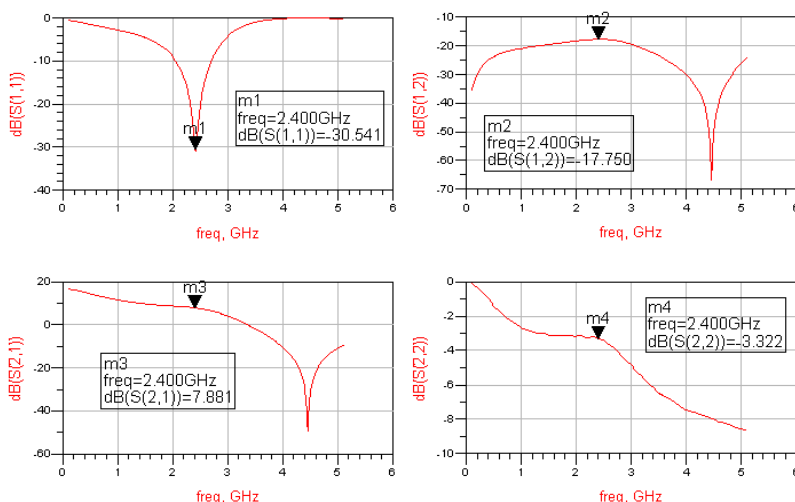


图 6.146 S11、S12、S21 和 S22 曲线

(1) 将原理图 S\_Param\_1 另存为原理图 S\_Param\_2。

(2) 删掉原理图 S\_Param\_2 上的单支节输入匹配网络 SSMtch，采用微带线段构成单支节匹配网络，这样便于优化。

(3) 选择【Tools】→【LineCalc】→【Start LineCalc】命令，弹出【LineCalc/Untitled】计算窗口，如图 6.147 所示。在【LineCalc/untitled】计算窗口设置如下。

① 在【Substrate Parameters】栏内对微带线的参数赋值，微带线参数的赋值与图 6.140 的赋值一致。

② 将频率 Freq 设置为 2.4GHz。

③ 将微带线的特性阻抗设置为  $50\Omega$ 。

上述设置完成后，单击【LineCalc/untitled】计算窗口中的【Synthesize】按钮，在【LineCalc/untitled】窗口中显示出计算结果如下。

$W = 1.52\text{mm}$ ，表示微带线特性阻抗为  $50\Omega$  时，微带线的宽度为  $1.52\text{mm}$ 。

(4) 在原理图的元件面板列表上，选择微带线【TLines-Microstrip】，元件面板上出现与微带线对应的元件图标。在微带线元件面板上，选择微带线 MLIN，两次插入原理图的画图区，将两个 MLIN 微带线的宽度  $W$  和长度  $L$ ，设置如下。

① 传输线 TL1 设置为宽度  $W = 1.52\text{mm}$ ，长度  $L = 2\text{mm}$ 。

② 传输线 TL2 设置为宽度  $W = 1.52\text{mm}$ ，长度  $L = 4.89\text{mm}$ 。

③ 将传输线 TL2 的长度设置为可优化，优化范围为  $2\sim 20\text{mm}$ 。

(5) 在微带线元件面板上，选择微带线的 T 形结 MTEE，插入原理图的画图区，将 T 形结 MTEE 设置如下。

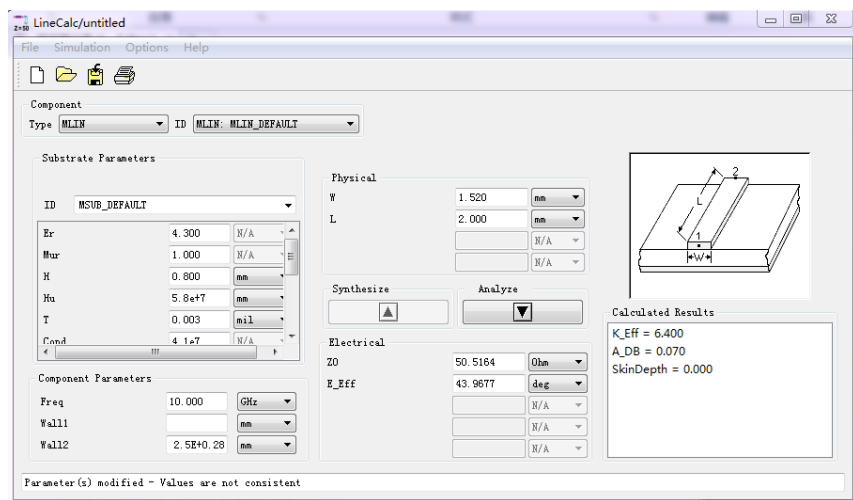


图 6.147 微带线尺寸计算窗口

T 形结 MTEE 设置为  $W1 = 1.52\text{mm}$ 、 $W2 = 1.52\text{mm}$  和  $W3 = 1.52\text{mm}$ 。

(6) 在微带线元件面板上，选择微带线的开路等效线 MLEF，插入原理图的画图区，将开路等效线 MLEF 设置如下。

① 开路等效线 MLEF 设置为宽度  $W = 1.52\text{mm}$ 、长度  $L = 9.03\text{mm}$ 。

② 将 MLEF 的长度设置为可优化，优化范围为  $2\text{mm}\sim 20\text{mm}$ 。

(7) 单击工具栏中的 按钮，将前面的 MLIN、MTEE 和 MLEF 连接起来，连接方式如图 6.148 所示，这构成输入端单支节匹配网络。

(8) 用同样的方法在输出端添加输出端单支节匹配网络，如图 6.149 所示，其中 TL4、TL5 和 TL6 的参数设置如下。

① 传输线 TL5 设置为宽度  $W = 1.52\text{mm}$ 、长度  $L = 2\text{mm}$ 。

② 传输线 TL4 设置为宽度  $W = 1.52\text{mm}$ 、长度  $L = 5\text{mm}$ 。

- ③ 将传输线 TL4 的长度设置为可优化优化范围为 2mm~20mm。
- ④ T 形结 MTEE 设置为  $W1 = 1.52\text{mm}$ 、 $W2 = 1.52\text{mm}$  和  $W3 = 1.52\text{mm}$ 。
- ⑤ 开路等效线 MLEF 设置为宽度  $W = 1.52\text{mm}$ 、长度  $L = 5\text{mm}$ 。
- ⑥ 将 MLEF 的长度设置为可优化，优化范围为 2~20mm。

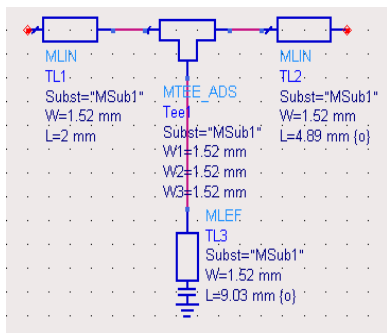


图 6.148 输入端单支节匹配网络

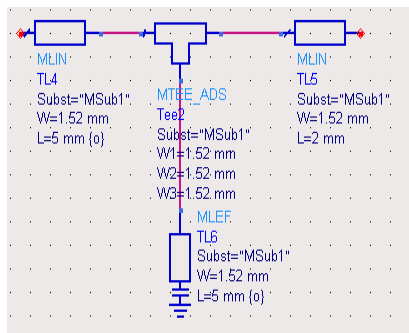


图 6.149 输出端单支节匹配网络

(9) 在原理图的元件面板列表上，选择优化元件【Optim/Stat/Yield/DOE】项，在优化的元件面板上，选择优化控件 Optim 插入原理图的画图区，并选择目标控件 Goal 插入到原理图的画图区，共插入 2 个目标控件 Goal。

(10) 双击画图区的优化控件 Optim，打开【Nominal Optimization】窗口，在【Nominal Optimization】窗口中设置优化控件，设置优化控件的步骤如下。

- ① 选择随机 Random 优化方式。
- ② 优化次数选择 200 次。
- ③ 其余的选项保持默认状态。

(11) 下面设置目标控件 Goal1。双击目标控件 1，设置如下。

- ① 选择 Expr 为  $\text{dB}(S(1, 1))$ 。选择目标控件的期望值为用 dB 表示的 S11。
- ② 选择 SimInstanceName=“SP2”。仿真控件选为 SP2。
- ③ 选择 Max 为 -20。期望值 S11 的最大值为 -20dB。
- ④ 其余的选项保持默认状态。

(12) 设置目标控件 2。

目标控件 2 的设置如下。

- ① 选择 Expr 为  $\text{dB}(S(2, 2))$ 。选择目标控件的期望值为用 dB 表示的 S22。
- ② 选择 SimInstanceName=“SP2”。仿真控件选为 SP2。
- ③ 选择 Max 为 -15。期望值 S22 的最大值为 -15dB。
- ④ 其余的选项保持默认状态。

原理图中设置完成的优化控件 Optim 和目标控件 Goal 如图 6.150 所示。

(13) 在 S 参数仿真元件面板上，选择 S 参数仿真控件 SP2，插入原理图的画图区，对 S 参数仿真控件 SP2 设置如下。

- ① 频率扫描类型选为线性 Linear。
- ② 频率扫描的起始值设为 2.36GHz。
- ③ 频率扫描的终止值设为 2.44GHz。



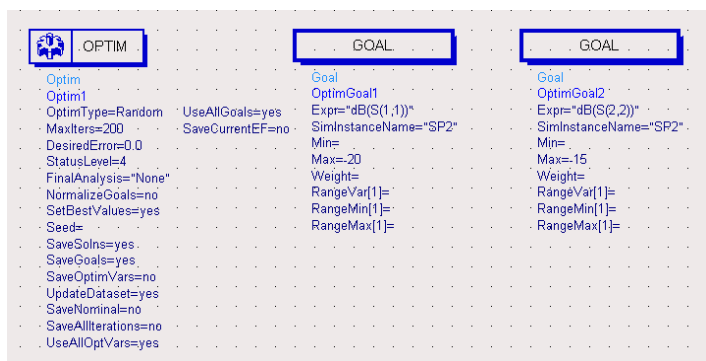


图 6.150 设置完成的优化控件和目标控件

④ 频率扫描的步长设为 0.01GHz。

⑤ 其余的参数保持默认状态。

单击 S 参数仿真控件设置窗口中的【OK】按钮，完成对 S 参数仿真控件的设置，现在用于 S 参数仿真的控制器如图 6.151 所示。

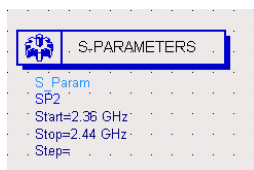


图 6.151 S 参数仿真控件 SP2

(14) 在原理图工具栏中单击 按钮，运行仿真，仿真结束后，数据显示视窗自动弹出。数据显示视窗的初始状态没有任何数据显示，用户自己选择需要显示的数据和数据显示的方式，这里用矩形图显示 SP1 仿真的 S11、S12、S21 和 S22 曲线，S11、S12、S21 和 S22 曲线如图 6.152 所示，单击工具栏中的 按钮，保存数据。

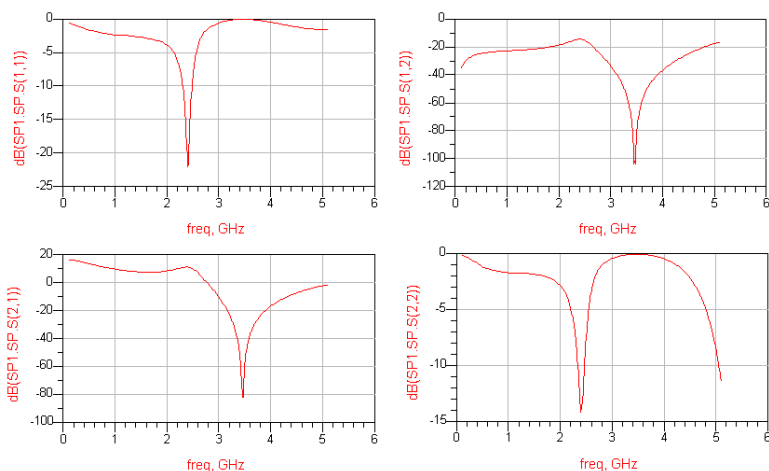


图 6.152 SP1 仿真的 S11、S12、S21 和 S22 曲线

(15) 在数据显示视窗用矩形图显示 SP2 仿真的 S11、S12、S21 和 S22 曲线，S11、S12、S21 和 S22 曲线如图 6.153 所示，单击工具栏中的 按钮，保存数据。

(16) 仿真结束后，选择【Simulate】→【Update Optimization Values】命令，将优化后的值保存在原理图中，优化后输入/输出匹配网络中微带线段的长度值如下。

① 输入匹配网络中微带线段 TL2 的长度值为  $L = 2.74\text{mm}$ 。

② 输入匹配网络中微带线段 TL3 的长度值为  $L = 11.95\text{mm}$ 。



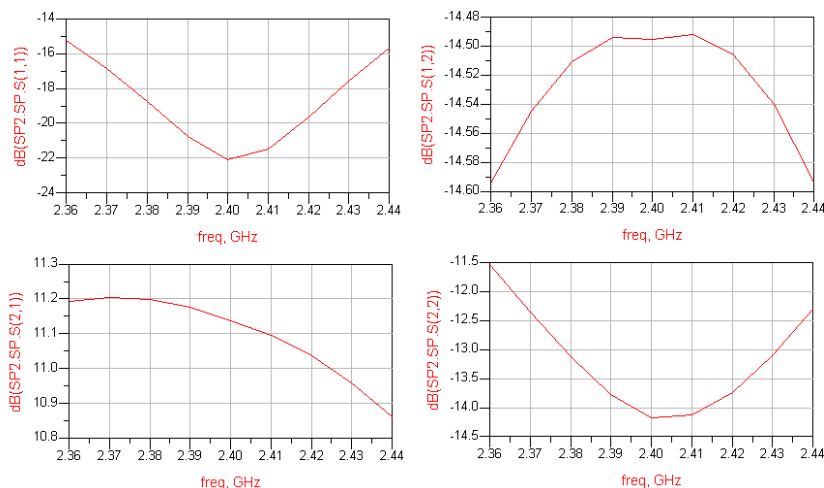


图 6.153 SP2 仿真的 S11、S12、S21 和 S22 曲线

③ 输出匹配网络中微带线段 TL4 的长度值为  $L=15.19\text{mm}$ 。

④ 输出匹配网络中微带线段 TL6 的长度值为  $L=11.88\text{mm}$ 。

5) 低噪声放大器设计指标的的实现

(1) 双击 S 参数仿真控件 SP2, 选中其中的【Calculate Noise】选项, 计算工作带宽内的噪声系数。

(2) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择稳定性因子仿真控件 StabFact, 插入原理图的画图区, 观察工作带宽内放大器的稳定性。稳定性因子仿真控件如图 6.154 所示。

(3) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择驻波比仿真控件 VSWR, 两次插入原理图的画图区, 观察工作带宽内输入/输出驻波比。输入/输出驻波比仿真控件如图 6.155 所示。

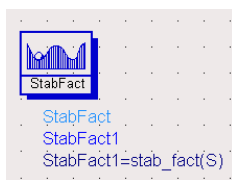


图 6.154 稳定性因子仿真控件



图 6.155 输入/输出驻波比仿真控件

(4) 在原理图视窗上, 去掉优化控件 Optim, 不让它出现在原理图中, 去掉的方法是单击原理图工具栏中的【Deactive or Active Component】按钮, 然后单击优化控件 Optim, 若优化控件 Optim 打了红叉, 表示已经被关掉。

(5) 重新执行 S 参数仿真, 仿真后查看放大器的噪声系数、稳定性因子、输入驻波比和输出驻波比, 噪声系数如图 6.156 所示, 稳定性因子如图 6.157 所示, 输入驻波比和输出驻波比如图 6.158 所示。

(6) 由图 6.155、图 6.156、图 6.157 和图 6.158 可以看出, 在工作带宽内增益、噪声系数、稳定性因子、输入驻波比和输出驻波比的参数如下。

- ① 增益在工作带宽内的值达到 11dB, 表明在工作带宽内的增益符合技术指标。
- ② 噪声系数在工作带宽内的值小于 2.36, 表明噪声系数符合技术指标。
- ③ 稳定性因子在工作带宽内的值大于 1, 表明绝对稳定。

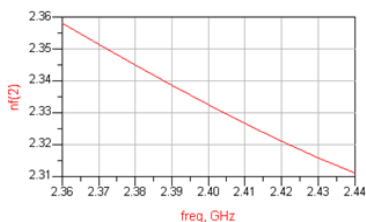
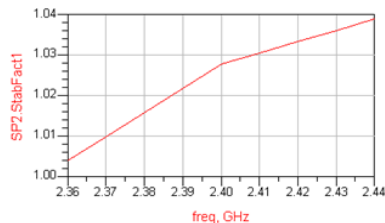
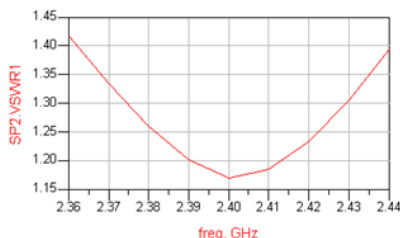
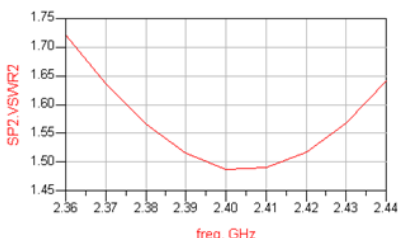
图 6.156 噪声系数  $nf(2)$  曲线

图 6.157 稳定性因子曲线



(a) 输入驻波比曲线



(b) 输出驻波比曲线

图 6.158 输入/输出驻波比曲线

④ 输入驻波比工作带宽内的值小于 1.5，表明输入驻波比满足技术指标。

⑤ 输出驻波比工作带宽内的值小于 1.75，表明输出驻波比满足技术指标。

上述参数满足技术指标，表明 SP 模型设计仿真任务完成。

#### 4. 封装模型

对封装模型的仿真是指对元件库中 pb 模型的仿真，对封装模型的设计仿真需要考虑偏置网络，对封装模型的仿真结果会与对 SP 模型的仿真结果有差异，需要对电路做新的优化。

本小节将利用 pb 模型元件 pb\_hp\_AT32011\_19950105 设计低噪声放大器，该模型需要设计偏置网络并重新进行参数仿真，通过优化输入/输出匹配网络实现设计目标。

##### 1) 计算偏置网络中的电阻

(1) 将晶体管工作点扫描的原理图 DC\_curve 另存为 DC\_curve1。

(2) 将变量控件 VAR 中的  $V_{CE}=0V$  修改为  $V_{CE}=2.7V$ 。

(3) 删掉原理图中的参数扫描控制器 (Parameters Weep)。

(4) 修改直流仿真控制器的设置，修改如下。

① 进入【Sweep】项，参数扫描【Parameters to Sweep】设置为 IBB。

② 【Sweep Type】设为【Linear】。


③ 【IBB】扫描的起始值设为 0。

④ 【IBB】扫描的终止值设为  $1e-4$ 。

⑤ 【IBB】扫描的步长设为  $1e-5$ 。

(5) 在晶体管的基极插入一个节点，节点名称为 VBE。

(6) 上述设置完成后，用于计算偏置网络中电阻的原理图 DC\_curve1，如图 6.159 所示。

(7) 单击原理图工具栏中的  按钮，执行仿真，仿真结束后，数据显示视窗自动弹出。

(8) 在数据显示视窗中，选择数据列表显示方式，显示 IBB、VBE 和 IC.i 的扫描数据，

如图 6.160 所示。

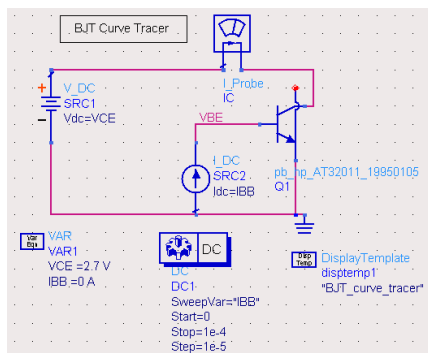


图 6.159 计算偏置网络中电阻的原理图

IBB	VBE	IC.i	IBB
0.000	83.45 mV	2.625 pA	0.000
1.000E-5	762.6 mV	1.041 mA	1.000E-5
2.000E-5	781.8 mV	2.016 mA	2.000E-5
3.000E-5	793.2 mV	2.932 mA	3.000E-5
4.000E-5	801.5 mV	3.797 mA	4.000E-5
5.000E-5	808.0 mV	4.618 mA	5.000E-5
6.000E-5	813.4 mV	5.401 mA	6.000E-5
7.000E-5	818.1 mV	6.151 mA	7.000E-5
8.000E-5	822.2 mV	6.872 mA	8.000E-5
9.000E-5	825.8 mV	7.566 mA	9.000E-5
1.000E-4	829.1 mV	8.235 mA	1.000E-4

图 6.160 IBB、VBE 和 IC.i 的扫描数据

(9) 由图 6.160 可以看出, 在  $V_{ce} = 2.7V$ 、 $I_c = 2mA$  时,  $IBB$  和  $V_{BE}$  的值如下。

①  $IBB = 2E-5A$ 。

②  $V_{BE} = 781.8mV$ 。

(10) 在数据显示视窗中, 插入两个计算偏置电阻的方程, 方程如下。

①  $R_b = (2.7 - V_{BE}) / I_{BB}$ 。

②  $R_c = 2.3 / I_{C.i}$ 。

计算偏置电阻的方程如图 6.161 所示。

$$\text{Eqn } R_b = (2.7 - V_{BE}) / I_{BB}$$

$$\text{Eqn } R_c = 2.3 / I_{C.i}$$

图 6.161 计算偏置电阻的方程

IBB	Rb	Rc	IBB
0.000	<invalid>	8.762E11	0.000
1.000E-5	193741.2...	2.210E3	1.000E-5
2.000E-5	95912.499	1.141E3	2.000E-5
3.000E-5	63560.232	784.519	3.000E-5
4.000E-5	47463.329	605.805	4.000E-5
5.000E-5	37840.072	498.061	5.000E-5
6.000E-5	31443.047	425.822	6.000E-5
7.000E-5	26884.731	373.900	7.000E-5
8.000E-5	23473.069	334.702	8.000E-5
9.000E-5	20824.382	304.008	9.000E-5
1.000E-4	18708.877	279.282	1.000E-4

图 6.162 IBB、Rb 和 Rc 的扫描数据

(11) 在数据显示视窗中, 选择数据列表显示方式, 显示  $R_b$  和  $R_c$  的数据,  $IBB$ 、 $R_b$  和  $R_c$  的数据如图 6.162 所示。

(12) 由图 6.162 可以看出, 在  $IBB = 2E-5A$  时,  $R_b$  和  $R_c$  的值如下。

①  $R_b = 96k\Omega$ 。

②  $R_c = 1141\Omega$ 。

## 2) 设计偏置网络

利用前面计算出来的  $R_b = 96k\Omega$  和  $R_c = 1141\Omega$ , 设计偏置网络。

(1) 新建原理图 DC\_curve2。


(2) 在元件库中选择 pb 模型元件 pb\_hp\_AT32011\_19950105, 插入原理图中。


(3) 在频域源 Sources-Freq Domain 元件面板上, 选择直流电压源  $V_{DC}$  插入到原理图中, 将电压设置为  $V_{dc} = 5V$ 。

(4) 在集总参数 Lumped-Components 元件面板上, 选择电阻  $R$ , 两次插入原理图中, 将电阻设置如下。

①  $R_1 = 1141\Omega$ 。

②  $R_2 = 96k\Omega$ 。

(5) 在原理图的工具栏中单击  按钮，将地线 (Ground) 插入原理图中，让晶体管的发射极接地。

(6) 单击工具栏中的  按钮，将原理图中的频域源、两个电阻和 pb 模型元件连接起来，连接方式如图 6.163 所示。

(7) 在原理图的各个节点上，可以查看电压和电流值，查看的步骤如下。

① 在原理图视窗中，选择【Simulate】→【Annotate DC Solution】命令。

② 偏置电路原理图上会自动显示各个节点处的电压和电流值，这时的偏置原理图如图 6.164 所示，可以看出偏置电路满足技术指标。

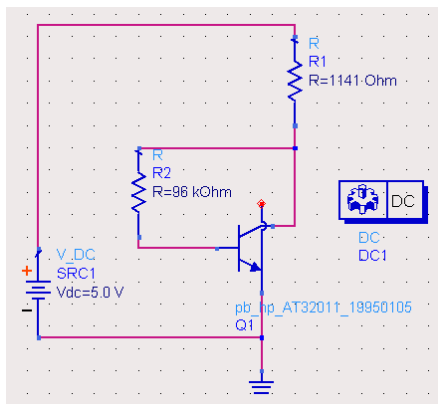


图 6.163 偏置电路原理图

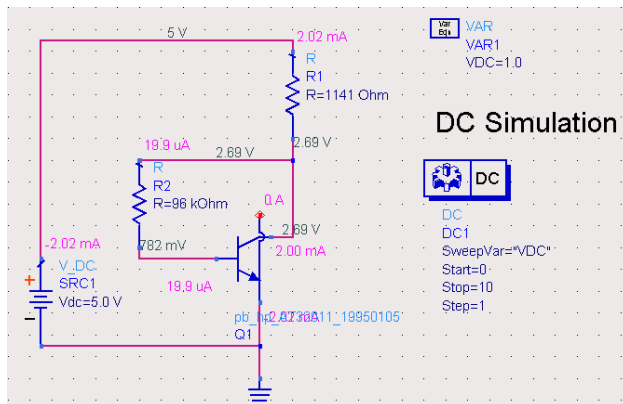


图 6.164 偏置电路上各节点的电压和电流值


③ 在原理图上，选择【Simulate】→【Clear DC Annotate】命令，可以清除原理图上各个节点处电压和电流的标值。

3) 采用封装模型设计低噪声放大器

(1) 将 SP 模型的原理图 S\_Params\_2 另存为封装模型的原理图 package。

(2) 将原理图 package 中的 SP 模型元件 sp\_hp\_AT32011\_5\_19950105 更换为 pb 模型元件 pb\_hp\_AT32011\_19950105。

(3) 在原理图上，去掉优化和目标控件，不让它们出现在生成的版图中，去掉的方法是单击原理图工具栏中的【Deactive or Active Component】按钮，然后单击优化和目标控件，若优化和目标控件打了红叉，表示已经被关掉。

(4) 在频域源【Sources-Freq Domain】元件面板上，选择直流电压源 V\_DC 插入原理图中，将电压设置为 Vdc=5V。在原理图的工具栏中单击  按钮，将地线 (Ground) 插入原理图中，让直流电压源 V\_DC 接地。

(5) 在集总参数【Lumped-Components】元件面板上，选择【DC Feed】元件，两次插入原理图电路中。

(6) 在集总参数【Lumped-Components】元件面板上，选择【DC Blok】元件，两次插入原理图电路中。


(7) 在集总参数【Lumped-Components】元件面板上，选择电阻 R，两次插入原理图中，将电阻设置如下。


① R1=1141Ω。

② R2=96kΩ。

(8) 封装电路原理图如图 6.165 所示。

#### 4) 封装模型低噪声放大器仿真

(1) 在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。数据显示视窗的初始状态没有任何数据显示, 用户自己选择需要显示的数据和数据显示的方式。

(2) 用矩形图显示 SP2 仿真的 S11、S12、S21 和 S22 曲线, S11、S12、S21 和 S22 曲线如图 6.166 所示, 单击工具栏中的  按钮, 保存数据。

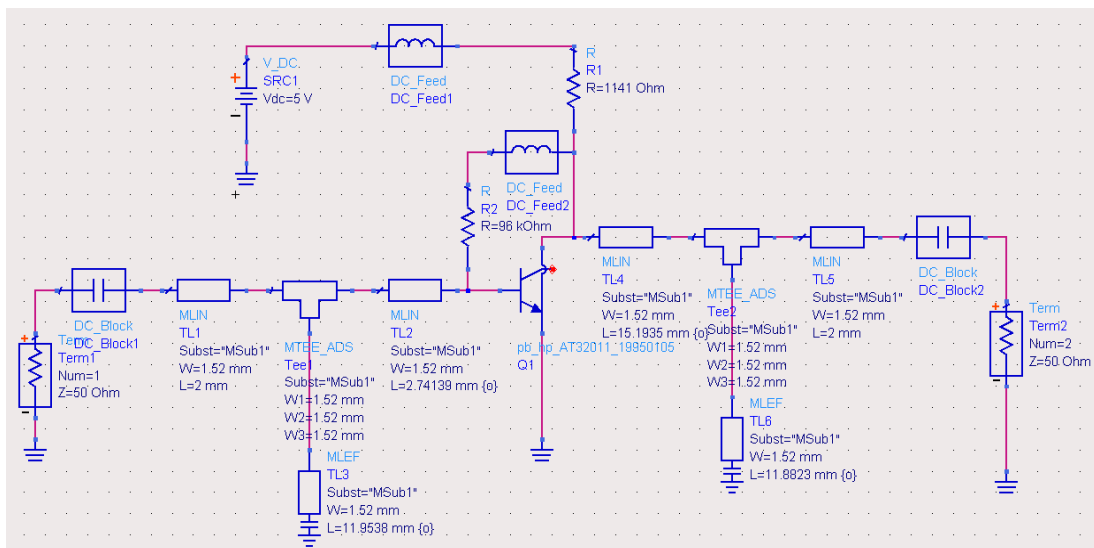


图 6.165 封装电路原理图

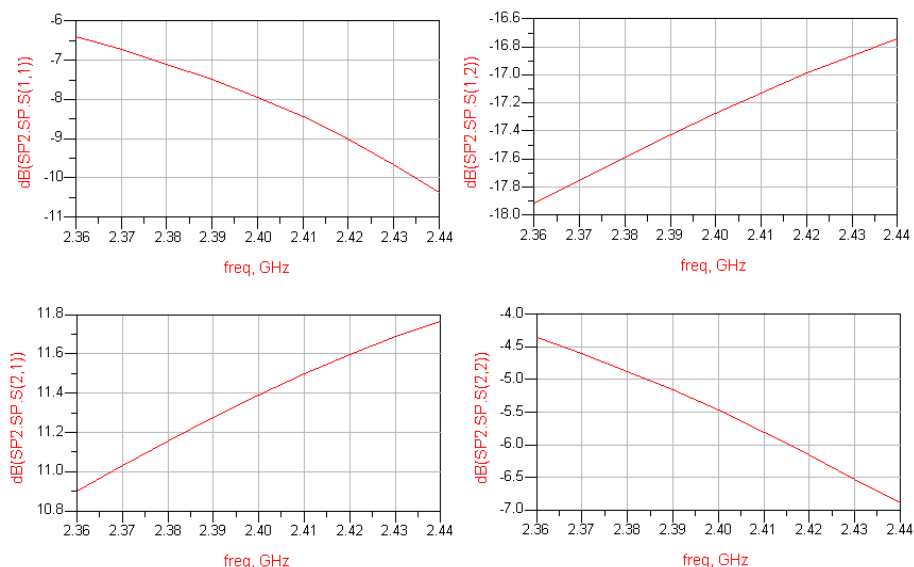




图 6.166 封装电路仿真的 S11、S12、S21 和 S22 曲线

(3) 用矩形图显示 SP2 仿真的输入/输出驻波比曲线, 如图 6.167 所示, 单击工具栏中的  按钮, 保存数据。

(4) 用矩形图显示 SP2 仿真的稳定性因子和噪声系数曲线, 如图 6.168 所示, 单击工具栏中的  按钮, 保存数据。

(5) 由图 6.166、图 6.167 和图 6.168 可以看出, 在工作带宽内增益、噪声系数、稳定性因子、输入驻波比和输出驻波比的参数如下。

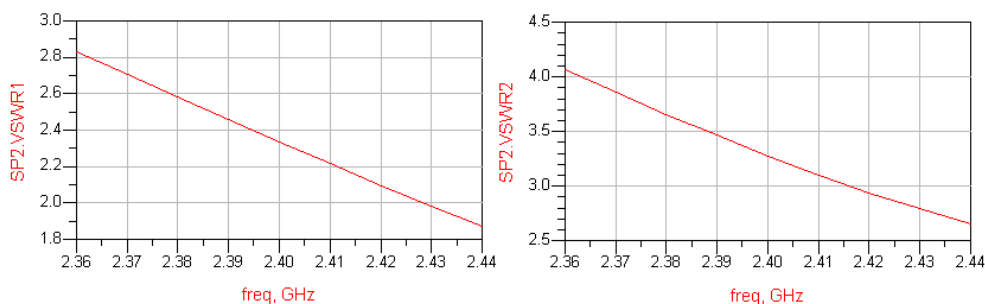


图 6.167 输入/输出驻波比曲线

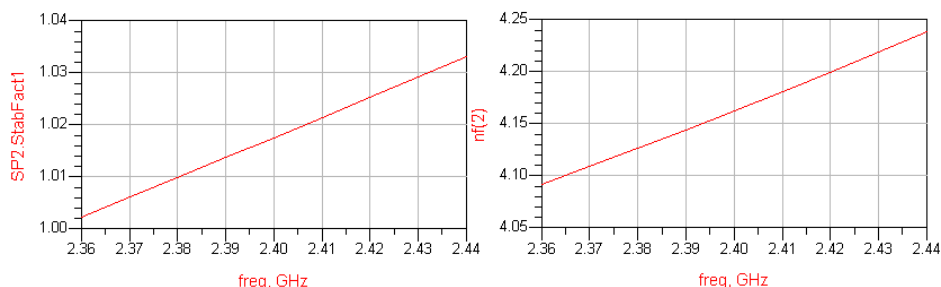


图 6.168 稳定性因子和噪声系数曲线

- ① 增益在工作带宽内的值达到 11dB, 表明在工作带宽内的增益符合技术指标。
- ② 噪声系数在工作带宽内的值大于 4, 表明噪声系数不符合技术指标。
- ③ 稳定性因子在工作带宽内的值大于 1, 表明绝对稳定。
- ④ 输入驻波比工作带宽内的值大于 2, 表明输入驻波比不满足技术指标。
- ⑤ 输出驻波比工作带宽内的值大于 3, 表明输出驻波比不满足技术指标。
- (6) 因为参数不满足技术指标, 需要重新设置优化目标, 重新仿真。

#### 5) 封装模型优化与仿真

(1) 在原理图视窗上, 使优化控件和目标控件重新有效, 方法是单击原理图工具栏中的 **【Deactive or Active Component】** 按钮, 然后单击优化控件和目标控件, 若优化控件和目标控件的红叉消失, 表示优化控件和目标控件已经重新有效。

(2) 双击画图区的优化控件 Optim, 打开 **【Nominal Optimization】** 窗口, 在 **【Nominal Optimization】** 窗口中设置优化控件, 设置优化控件的步骤如下。

- ① 选择随机 Random 优化方式。
- ② 优化次数选择 200 次。
- ③ 其余的选项保持默认状态。

(3) 下面设置目标控件 Goal1。双击目标控件 1, 设置如下。

- ① 选择 Expr 为 dB (S (1, 1))。选择目标控件的期望值为用 dB 表示的 S11。

② 选择 SimInstanceName=“SP2”。仿真控件选为 SP2。

③ 选择 Max 为-15。期望值 S11 的最大值为-15dB。

④ 其余的选项保持默认状态。

(4) 设置目标控件 2。

目标控件 2 的设置如下。

① 选择 Expr 为 dB (S (2, 2))。选择目标控件的期望值为用 dB 表示的 S22。



② 选择 SimInstanceName=“SP2”。仿真控件选为 SP2。

③ 选择 Max 为-10。期望值 S22 的最大值为-10dB。

④ 其余的选项保持默认状态。

原理图中设置完成的目标控件 Goal 如图 6.169

所示。

(5) 在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。在数据显示视窗用矩形图显示 SP2 仿真的 S11、S12、S21 和 S22 曲线, S11、S12、S21 和 S22 曲线如图 6.170 所示, 单击工具栏中的  按钮, 保存数据。

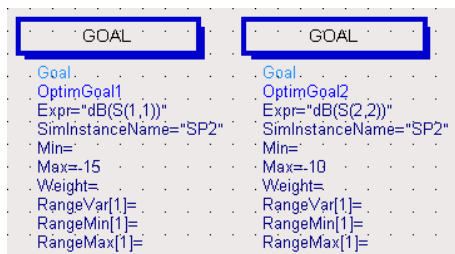


图 6.169 设置完成的目标控件

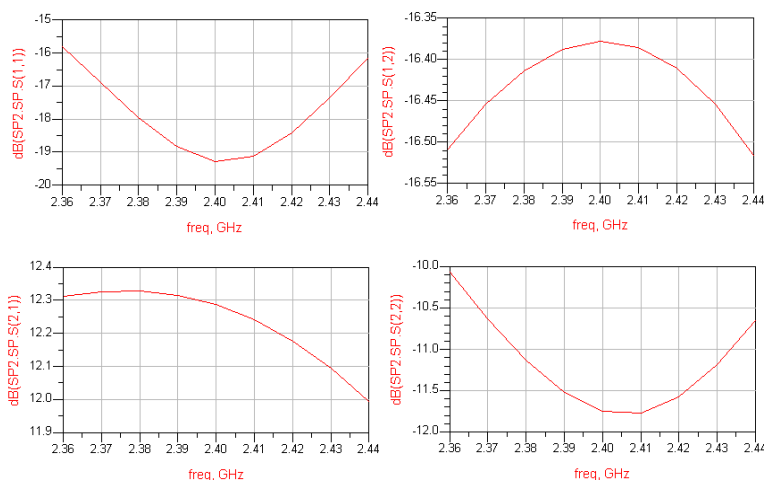


图 6.170 优化后的 S11、S12、S21 和 S22 曲线

(6) 优化仿真后查看放大器的稳定性因子和噪声系数, 稳定性因子和噪声系数的曲线如图 6.171 所示。

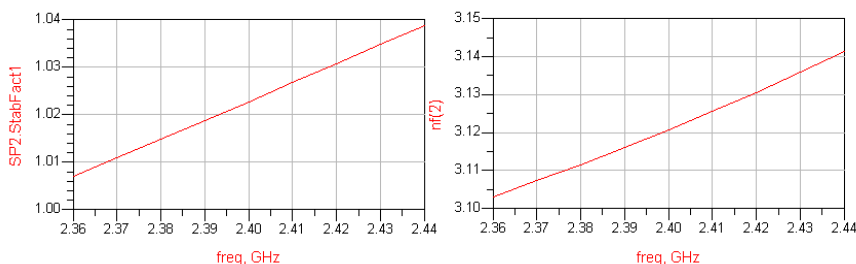


图 6.171 优化后的稳定性因子和噪声系数曲线

(7) 优化后查看放大器的输入驻波比和输出驻波比, 输入驻波比和输出驻波比的曲线如图 6.172 所示。

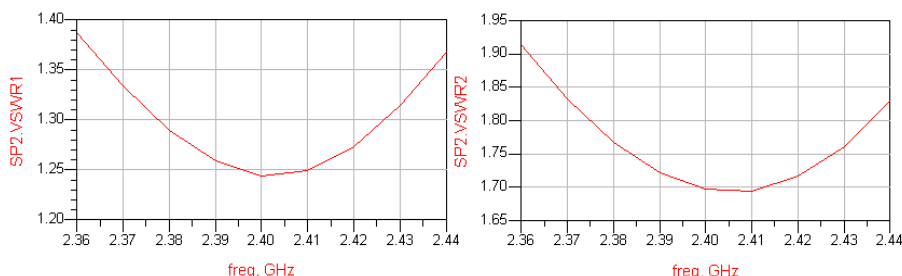


图 6.172 优化后的输入输出驻波比曲线

(8) 选择【Simulate】→【Update Optimization Values】命令, 将优化后的值保存在原理图中, 优化后输入/输出匹配网络中微带线段的长度值如下。

- ① 输入匹配网络中微带线段 TL2 的长度值为  $L = 5.51\text{mm}$ 。
- ② 输入匹配网络中微带线段 TL3 的长度值为  $L = 10.01\text{mm}$ 。
- ③ 输出匹配网络中微带线段 TL4 的长度值为  $L = 16.15\text{mm}$ 。
- ④ 输出匹配网络中微带线段 TL6 的长度值为  $L = 11.77\text{mm}$ 。

(9) 由图 6.170、图 6.171 和图 6.172 可以看出, 在工作带宽内增益、噪声系数、稳定性因子、输入驻波比和输出驻波比的参数如下。

① 增益在工作带宽内的值达到 12dB, 起伏小于 0.2dB, 表明在工作带宽内的增益符合技术指标。

② 噪声系数在工作带宽内的值小于 3, 表明噪声系数符合技术指标。

③ 稳定性因子在工作带宽内的值大于 1, 表明绝对稳定。

④ 输入驻波比工作带宽内的值小于 1.42, 表明输入驻波比满足技术指标。

⑤ 输出驻波比工作带宽内的值小于 1.92, 表明输出驻波比满足技术指标。

上述参数满足技术指标, 表明封装模型低噪声放大器的设计仿真任务完成。

## 6.7 混频器

本节的混频器由两个二极管、低通滤波器、 $90^\circ$  混合 3dB 耦合器和匹配网络构成, 射频频率为 3.6GHz, 本振频率为 3.8GHz, 输出中频为 200MHz。

### 6.7.1 混频器基本原理

#### 1. 定向耦合器

下面将创建一个关于混频器的项目, 在这个项目中, 本节会创建微带分支定向耦合器的原理图, 完成原理图的设计与仿真工作。

##### 1) 创建项目

使用主视窗创建项目, 项目命名为 Mixer\_prj。创建项目的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件, 弹出主视窗。



(2) 选择主视窗中的【File】→【New Workspace】命令，会弹出【New Workspace】对话框，在【New Workspace】对话框中，将“项目名称”设为“Mixer”。

(3) 单击【Finish】按钮，完成创建项目。

## 2) 创建原理图

选择主视窗中的【File】→【New Schematic】命令，弹出【New Schematic】对话框。在【New Schematic】对话框中，做如下设置。

(1) 输入新建原理图的名称为“Coupler”。

(2) 选择【Schematic Design Templates】为【none】。

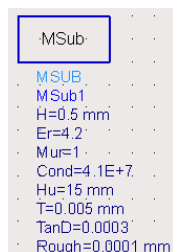
(3) 单击【OK】按钮，完成创建原理图的工作。

## 3) 设置微带线参数及利用工具 Tools 计算

(1) 设置微带线参数。

在微带线元器件面板【TLines-Microstrip】上，选择 MSUB 插入到原理图的画图区，在画图区中双击 Musb，弹出【Microstrip Substrate】设置对话框，在这个对话框中，对微带线的参数设置如下。

- ①  $H=0.5\text{mm}$ ，表示微带线基板的厚度为  $0.5\text{mm}$ 。
- ②  $\epsilon_r=4.2$ ，表示微带线基板的相对介电常数为  $4.2$ 。
- ③  $\mu_r=1$ ，表示微带线的相对磁导率为  $1$ 。
- ④  $\text{Cond}=4.1\text{E}+7$ ，表示微带线导体的电导率为  $4.1\text{E}+7$ 。
- ⑤  $H_u=15\text{mm}$ ，表示微带线的封装高度为  $15\text{mm}$ 。
- ⑥  $T=0.005\text{mm}$ ，表示微带线的导体厚度层为  $0.005\text{mm}$ 。
- ⑦  $\text{TanD}=0.0003$ ，表示微带线的损耗角正切为  $0.0003$ 。
- ⑧  $\text{Rough}=0.0001\text{mm}$ ，表示微带线表面粗糙度为  $0.0001\text{mm}$ 。



完成设置的微带线 MSUB 控件如图 6.173 所示。

图 6.173 微带线参数设置

(2) 利用工具 Tools 计算。

ADS 软件中的工具 Tools，可以对不同的传输线进行计算，而对于微带线来说，可以进行物理尺寸和电参数之间的数值计算。

在原理图 BLCoupler 上，选择主视窗中的【Tools】→【LineCalc】→【Start LineCalc】命令，会弹出【LineCalc/untitled】计算窗口，在已知传输线的特性阻抗和相移的前提下，可以计算微带线的宽度和长度。在【LineCalc/untitled】计算窗口选择如下。

- ① Type 选择 MLIN，表示计算微带线。
- ②  $\text{Freq}=3.8\text{GHz}$ ，表示计算时采用频率为  $3.8\text{GHz}$ 。
- ③  $Z_0=50\text{ Ohm}$ ，表示计算时特性阻抗采用  $50\Omega$ 。
- ④  $E\_Eff=90\text{deg}$ ，表示计算微带线的长度时，采用  $90^\circ$  相移。
- ⑤  $\epsilon_r=4.2$ ，表示微带线基板的相对介电常数为  $4.2$ 。
- ⑥  $\mu_r=1$ ，表示微带线的相对磁导率为  $1$ 。
- ⑦  $\text{Cond}=4.1\text{E}+7$ ，表示微带线导体的电导率为  $4.1\text{E}+7$ 。
- ⑧  $H=0.5\text{mm}$ ，表示微带线基板的厚度为  $0.5\text{mm}$ 。
- ⑨  $H_u=15\text{mm}$ ，表示微带线的封装高度为  $15\text{mm}$ 。
- ⑩  $T=0.005\text{mm}$ ，表示微带线的导体厚度层为  $0.005\text{mm}$ 。
- ⑪  $\text{TanD}=0.0003$ ，表示微带线的损耗角正切为  $0.0003$ 。

⑫ Rough=0.0001mm, 表示微带线表面粗糙度为 0.0001mm。

完成设置后, 单击【LineCalc/ untitled】计算窗口中的【Synthesize】按钮, 在【LineCalc/ untitled】计算窗口中显示出的计算结果如下。

W=0.98mm, 表示微带线的宽度为 0.98mm。

L=11.01mm, 表示微带线的长度为 11.01mm。

这时的【LineCalc/ untitled】计算窗口如图 6.174 所示。

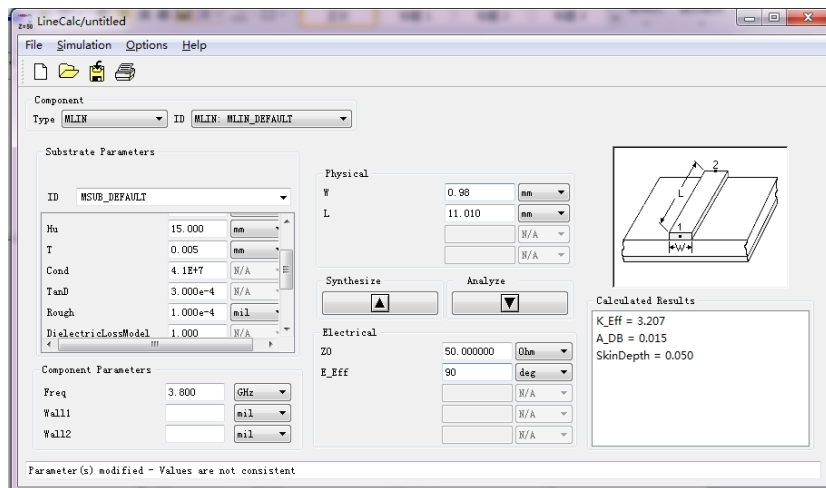


图 6.174 【LineCalc/ untitled】计算窗口

继续使用【LineCalc/ untitled】计算窗口进行计算, 计算频率为 3.8GHz、特性阻抗为 35.36Ω、相移为 90° 时微带线的宽度和长度, 微带线基板的参数保持不变, 在【LineCalc/ untitled】计算窗口中显示出的计算结果如下。

W=1.67mm, 表示微带线的宽度为 1.67mm。


L=10.74mm, 表示微带线的长度为 10.74mm。

#### 4) 设计原理图

在 Coupler 原理图上, 根据搭建微带分支定向耦合器原理图电路, 搭建原理图电路的基本步骤如下。

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择微带线元器件面板【TLines-Microstrip】, 元器件面板出现与微带线对应的元器件图标, 在微带线元器件面板上选择【MLIN】, 3 次插到原理图画图区, MLIN 是一段长度的微带线。

(2) 微带线元器件面板【TLines-Microstrip】上, 选择微带线的 T 形结 MTEE, 2 次插到原理图画图区。

(3) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的 3 个微带线 MLIN 和 2 个 T 形结 MTEE 连接起来, 连接方式如图 6.175 所示, 这样就构成了微带分支定向耦合器的两个端口。

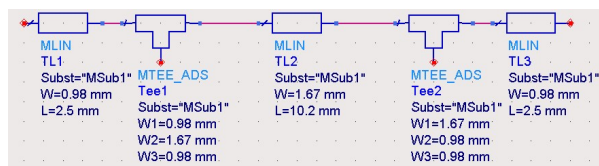


图 6.175 微带分支定向耦合器的两个端口

(4) 在微带线元件面板上选择【MLIN】，3次插到原理图画图区，然后选择微带线的T形结MTEE，2次插到原理图画图区。

(5) 单击工具栏中的 $\searrow$ 按钮，将原理图中的3个微带线MLIN和2个T形结MTEE连接起来，连接方式如图6.176所示，这样就构成了微带分支定向耦合器的另外两个端口。

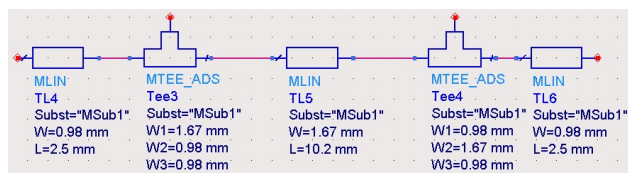


图 6.176 微带分支定向耦合器的另外两个端口

(6) 在微带线元件面板上选择【MLIN】，2次插到原理图画图区，图6.177为微带分支定向耦合器的原理图。

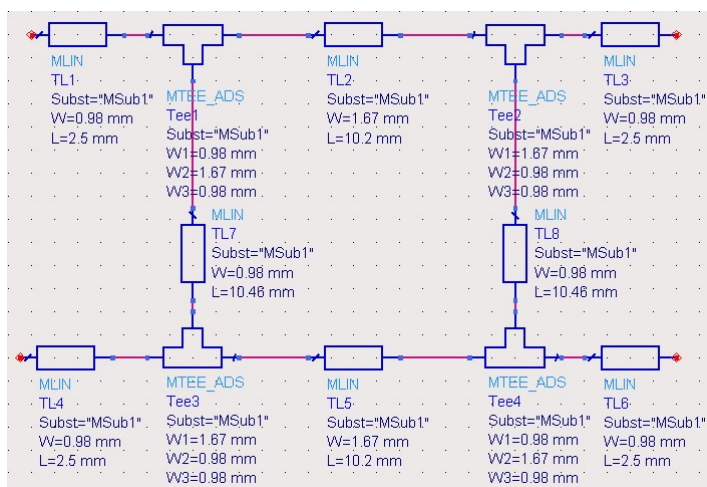


图 6.177 微带分支定向耦合器的原理图

### 5) 微带分支定向耦合器原理图仿真

(1) 在集总参数元件面板上，选择S参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与S参数仿真对应的元件图标。在S参数仿真元件面板上，选择负载终端Term，4次插入原理图中，定义负载终端Term 1为输入端口，负载终端Term 2为直通输出端口，负载终端Term 3为耦合输出端口，负载终端Term 4为隔离端口。

(2) 在原理图工具栏中单击 $\perp$ 按钮，将地线（Ground）4次插入原理图，让4个负载终端接地。

(3) 单击工具栏中的 $\searrow$ 按钮，将原理图中的负载终端Terms和微带分支定向耦合器连接起来，连接方式如图6.178所示。

(4) 在如图6.178所示的原理图中，选择S参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与S参数仿真对应的元件图标。在S参数仿真元件面板上，选择S参数仿真控制器SP，插入原理图中，表明将要做S参数仿真。

(5) 双击原理图中的S参数仿真控制器，打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框，在对话框中对【Frequency】项进行参数设置，如图6.179所示。

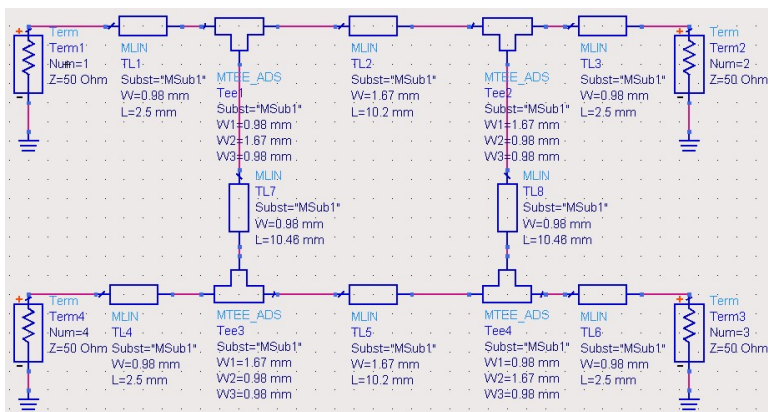


图 6.178 带有终端负载的微带分支定向耦合器原理图

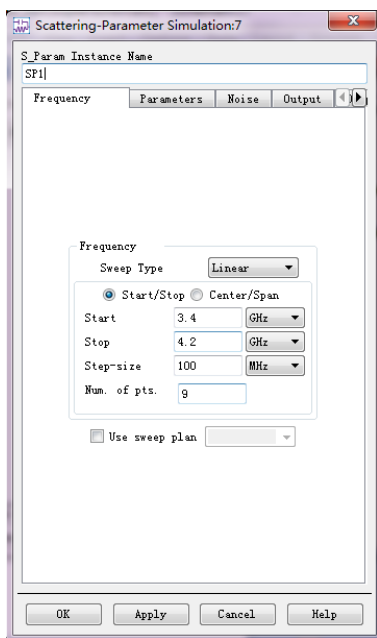


图 6.179 【Frequency】项参数设置

① 扫描的起始值设为 3.4GHz。

② 扫描的终止值设为 4.2GHz。

③ 扫描的间隔设为 0.1GHz。

④ 其余参数保持默认。

(6) 对原理图执行 S 参数仿真。

① 单击 按钮运行仿真。

② 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入 S11 的矩形图，并在 S11 曲线上插入一个标记 marker，插入点为 3.8GHz，显示在标记 marker 处 S11 的值为 -43.572dB。

③ 在数据显示视窗中插入 S21 的矩形图，并在 S21 曲线上插入一个标记 marker，插入点为 3.8GHz，显示在标记 marker 处 S21 的值为 -3.022dB。

④ 在数据显示视窗中插入 S31 的矩形图，并在 S31 曲线上插入一个标记 marker，插入点为 3.8GHz，显示在标记 marker 处 S31 的值为 -3.120dB。

⑤ 在数据显示视窗中插入 S41 的矩形图，并在 S41

曲线上插入一个标记 marker，插入点为 3.8GHz，显示在标记 marker 处 S41 的值为 -51.687dB。

S11、S21、S31 和 S41 的曲线如图 6.180 所示。由图可以看出，在中心频率处曲线满足技术指标。

## 2. 低通滤波器

下面用集总参数设计低通滤波器，低通滤波器的作用是对中频输出进行滤波。

### 1) 设计原理图

(1) 新建原理图 Filter。

(2) 在原理图的元件面板列表上，选择集总参数元件【Lumped-Components】项，在集总参数元件面板上，选择电感 L 和电容 C，插入原理图中，插入 3 个电容和 2 个电感。电感和电容的值设置如下。

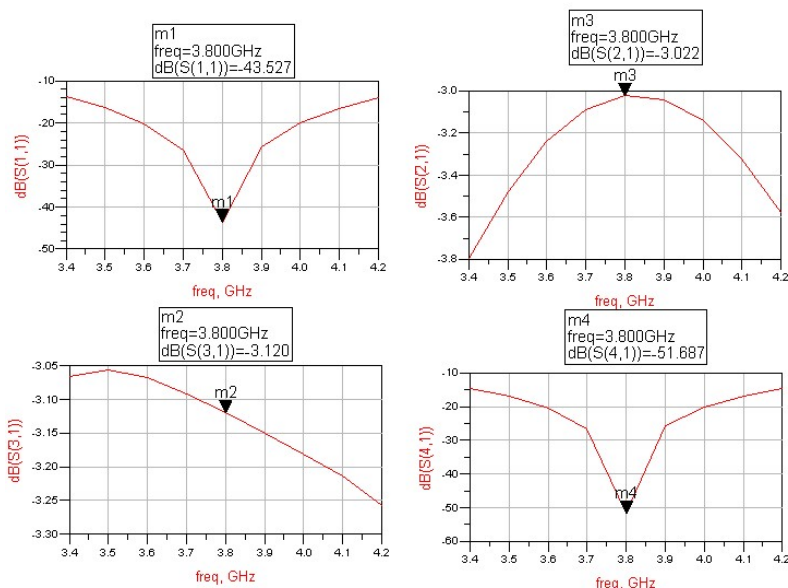


图 6.180 S11、S21、S31 和 S41 的曲线

- $L1=7.07\text{nH}$ 。
- $L2=3.99\text{nH}$ 。
- $C1=4.78\text{pF}$ 。
- $C2=6.2\text{pF}$ 。
- $C3=50\text{pF}$ 。

(3) 在原理图工具栏中单击 按钮，将地线 (Ground) 插入原理图，让两个电容接地。

(4) 单击工具栏中的 按钮，将电感和电容连接起来，连接方式如图 6.181 所示。

## 2) 低通滤波器的仿真

(1) 在集总参数元件面板上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上，选择负载终端 Term，2 次插入原理图中，定义负载终端 Term 1 为输入端口，负载终端 Term 2 为输出端口。

(2) 在原理图工具栏中单击 按钮，将地线 (Ground) 2 次插入原理图，让 2 个负载终端接地。

(3) 单击工具栏中的 按钮，将原理图中的负载终端 Terms 和低通滤波器连接起来，连接方式如图 6.182 所示。

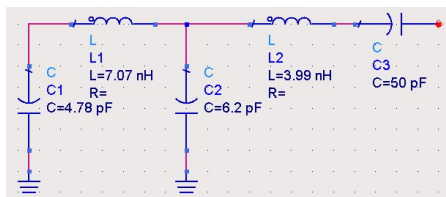


图 6.181 5 个元器件滤波器连接图

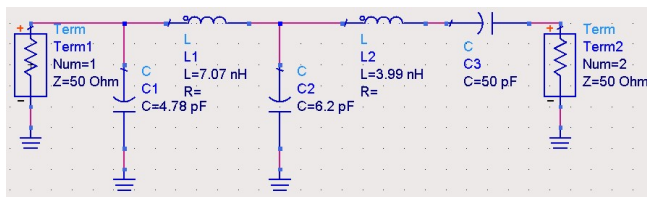



图 6.182 低通滤波器原理图

(4) 在如图 6.182 所示的原理图中，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上，选择 S 参数仿真控制器 SP，插入原理图中，表明将要做 S 参数仿真。

(5) 双击原理图中的 S 参数仿真控制器, 打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框, 在对话框中对【Frequency】项进行参数设置, 参数设置如图 6.183 所示。

- ① 扫描的起始值设为 0.01GHz。
- ② 扫描的终止值设为 3.0GHz。
- ③ 扫描的间隔设为 0.1GHz。
- ④ 其余参数保持默认。

(6) 对原理图执行 S 参数仿真。

- ① 单击  按钮运行仿真。
- ② 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入 S21 的矩形图, 并在 S21 曲线上插入一个标记 marker, S21 曲线如图 6.184 所示。

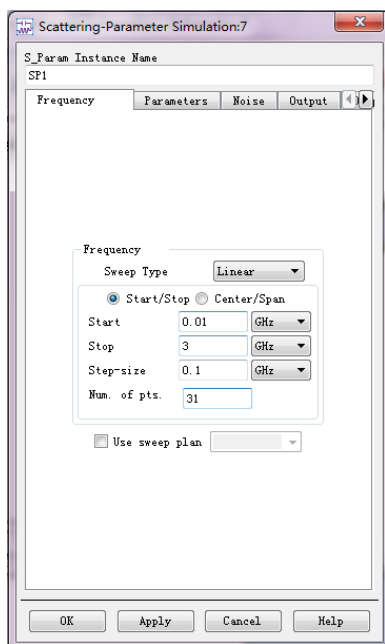


图 6.183 【Frequency】项参数设置

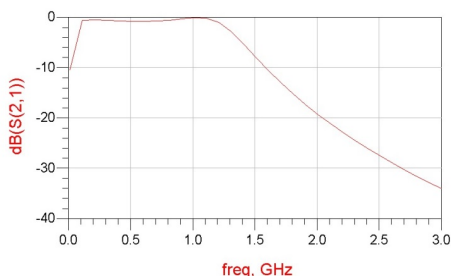


图 6.184 S21 曲线

## 6.7.2 设计实现混频器

### 1. 设计过程

(1) 新建原理图 Mixer1。

(2) 将图 6.177 所示的耦合器和图 6.181 所示的低通滤波器复制到原理图 Mixer1 中。

(3) 在图 6.177 所示的耦合器和图 6.181 所示的低通滤波器之间, 加上 2 个二极管及其匹配电路, 就构成了混频器电路, 混频器电路如图 6.185 所示。

(4) 如图 6.185 所示, 匹配电路的参数设置如下。

- ①  $L3=1.66\text{nH}$ 。
- ②  $L4=1.66\text{nH}$ 。
- ③  $C4=0.35\text{pF}$ 。
- ④  $C5=0.35\text{pF}$ 。



⑤ TL10 的宽为  $W=0.98\text{mm}$ ，长为  $L=18.6\text{mm}$ 。

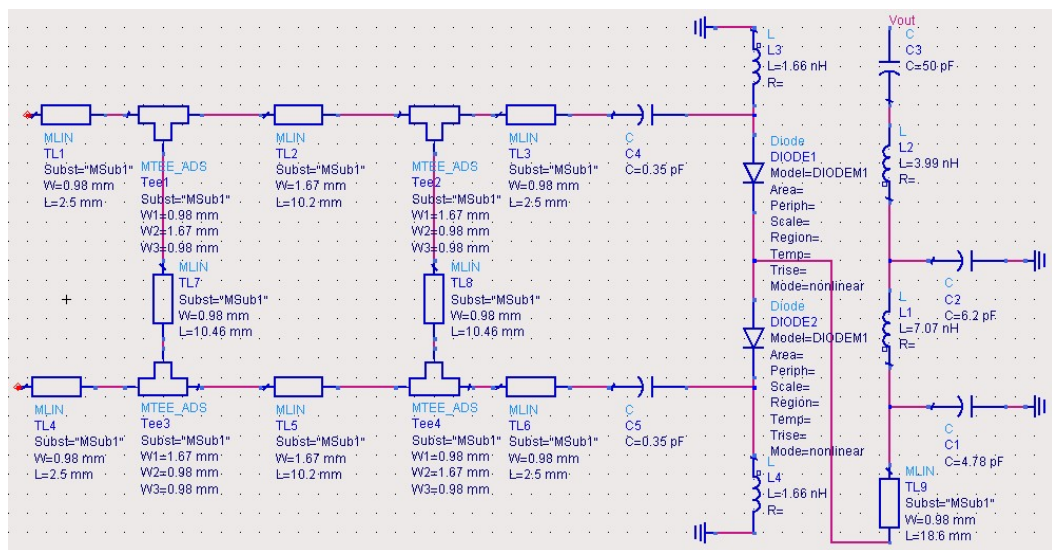


图 6.185 混频器电路

(5) 如图 6.185 所示，二极管的参数设置如下

在【Devices-Diodes】元器件面板上，选择一个二极管模型 Diodes M。

- ①  $I_s=5.0\text{e-}9\text{A}$ ，表示二极管的饱和电流。
- ②  $R_s=6.0\text{Ohm}$ ，表示二极管导通电阻为  $6\Omega$ 。
- ③  $N=1.02$ ，表示二极管发射系数为 1.02。
- ④  $T_t=0\text{ sec}$ ，表示二极管传输时间为 0 秒。
- ⑤  $C_{jo}=0.2\text{pF}$ ，表示二极管零偏置结电容为  $0.2\text{pF}$ 。
- ⑥  $V_j=8\text{V}$ ，表示二极管结电压为  $0.8\text{V}$ 。
- ⑦  $M=0.5$ ，表示二极管等级系数为 0.5。
- ⑧  $B_v=10\text{V}$ ，表示二极管击穿电压为  $10\text{V}$ 。
- ⑨  $I_{bv}=101\mu\text{A}$ ，表示二极管击穿电流为  $101\mu\text{A}$ 。
- ⑩ 其他参数默认不变。

二极管模型参数设置如图 6.186 所示。



图 6.186 二极管模型参数设置

## 2. 混频器仿真

本小节将利用上节设计的混频器进行仿真，对混频器的多项指标进行考察。

进行混频器输出信号频谱的仿真

(1) 输出信号频谱仿真原理图的建立。

① 打开原理图 Mixer1。

② 在原理图中选择频域源【Sources-Freq Domain】元件面板，在电路的输入端插入单频功率源 P\_1Tone，对单频功率源 P\_1 Tone 设置如下。

- $P=\text{polar}(\text{dbmtow}(20), 0)$ ，表示单频功率源输出信号的功率为  $20\text{dBm}$ 。
- $\text{Freq}=3.6\text{GHz}$ ，该频率表示射频频率，这是射频输入端口。
- 该功率源设置为端口 1。

端口 1 的单频功率源如图 6.187 所示。

③ 在原理图中选择频域源【Sources-Freq Domain】元件面板，在电路的输入端插入单频功率源 P\_1Tone，对单频功率源 P\_1Tone 设置如下。

- $P=polar(dbmtow(10), 0)$ ，表示单频功率源输出信号的功率为 10dBm。
- $Freq=3.8GHz$ ，该频率表示本振频率，这是本振输入端口。
- 该功率源设置为端口 2。

端口 2 的单频功率源如图 6.188 所示。

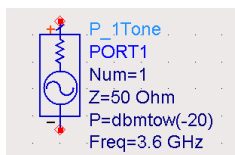


图 6.187 端口 1 的单频功率源

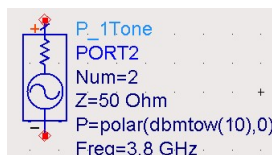


图 6.188 端口 2 的单频功率源

④ 在集总参数元件面板上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上，选择负载终端 Term 插入原理图中，定义负载终端 Term3 为输出端口，

⑤ 在原理图的输出端，插入节点 Vout。

单击工具栏中的  按钮，在弹出的【Wire/Pin Lable】对话框中输入 Vout，然后单击原理图中终端负载 3 与低通滤波器之间的连线，最后单击【Close】按钮关闭对话框，完成节点插入。

⑥ 将端口 1、端口 2 和端口 3 接地，原理图 Mixer1 如图 6.189 所示。

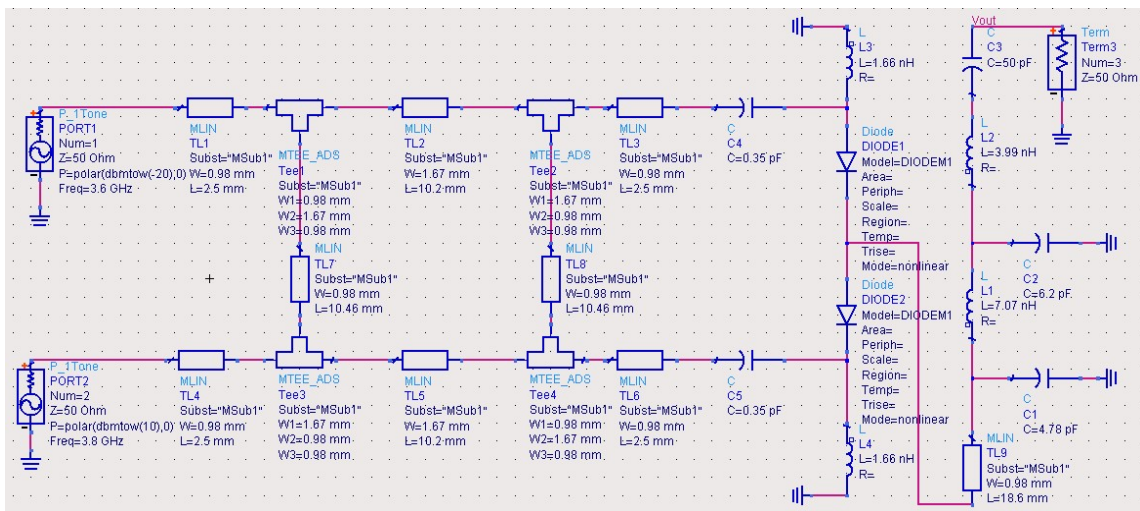


图 6.189 输出信号频谱仿真原理图

(2) 输出信号频谱仿真。

① 在原图中插入谐波平衡仿真控制器 Harmonic Balance，对谐波平衡控制器设置如下。


- $Freq[2]=3.6GHz$ ，表示谐波平衡仿真的第二个基准频率为变量 3.6GHz。
- $Order[1]=3$ ，表示谐波平衡仿真时第一个基波频率的最大谐波次数为 3。
- $Order[2]=3$ ，表示谐波平衡仿真时第二个基波频率的最大谐波次数为 3。



- MaxOrder=4，表示谐波平衡仿真时最大混合阶数为 4。

谐波平衡控制器设置如图 6.190 所示。

② 对原理图进行谐波平衡仿真。

- 在图 6.190 所示的原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真。

- 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入以“dBm”为单位 Vout 的矩形图，显示 Vout 的仿真结果。

- 在 Vout 曲线的 200MHz 处，插入一个标记 marker，可以显示 200MHz 处的输出功率。数据显示视窗如图 6.191 所示。

- 射频频率为 3.6GHz，本振频率为 3.8GHz，输出中频为 200MHz。由图 6.191 可以显示输出中频为 200MHz 及各次谐波等。

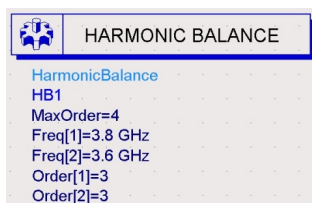


图 6.190 谐波平衡控制器设置

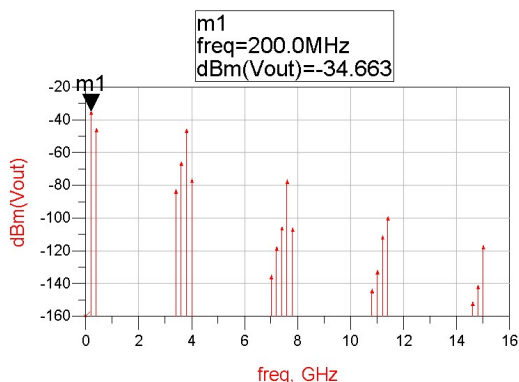


图 6.191 输出信号的功率谱

③ 在数据显示视窗口中插入 Mix 列表，显示中频输出端的仿真结果，Mix 数据列表如图 6.192 所示。

下面进行混频器本振功率仿真

(1) 将原理图 Mixer1 另存为 Mixer2。

(2) 对端口 2 单频功率源 P\_1 Tone 重新设置如下。

①  $P = \text{polar}(\text{dbmtow}(\text{LO\_pwr}), 0)$ ，表示单频功率源输出信号为变量 LO\_pwr。

② 其他设置默认不变。

(3) 在工具栏中选择【VAR】，插入到原理图中，将本振功率设置为 LO\_pwr=10，完成设置的变量控件【VAR】，如图 6.193 所示。

freq	Mix	
	Mix(1)	Mix(2)
0.0000 Hz	0	0
200.0 MHz	1	-1
400.0 MHz	2	-2
3.400 GHz	-1	2
3.600 GHz	0	0
3.800 GHz	1	1
4.000 GHz	2	-1
7.000 GHz	-1	2
7.200 GHz	0	2
7.400 GHz	1	1
7.600 GHz	2	0
7.800 GHz	3	-1
10.80 GHz	0	3
11.00 GHz	1	2
11.20 GHz	2	1
11.40 GHz	3	0
14.60 GHz	1	3
14.80 GHz	2	2
15.00 GHz	3	1

图 6.192 输出信号的数据列表

(4) 在谐波平衡仿真元器件面板上，选择参数扫描控制器【PARAMETER SWEEP】，插入到原理图中，参数扫描控制器的参数设置如下。

① SweepVar= “LO\_pwr”，表示扫描变量为本振功率 LO\_pwr。

② SimInstanceName [1]= “HB1”，表示扫描的仿真为 HB1。

③ Start=1，表示扫描的起始值。

④ Stop= 20，表示扫描的终止值。

⑤ Step=1，表示扫描的间隔值。

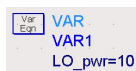



图 6.193 变量控件

设置完成的参数扫描控制器如图 6.194 所示。

(5) 在原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真。

① 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入以“dBm”为单位的  $V_{out}$  的矩形图，显示  $V_{out}$  的仿真结果。

② 在  $V_{out}$  曲线的峰值处，插入一个标记 marker。数据显示视窗如图 6.195 所示。

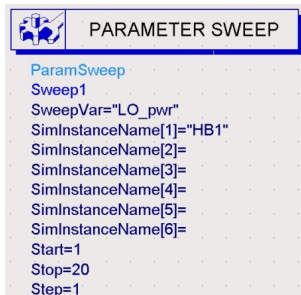


图 6.194 参数扫描控制器

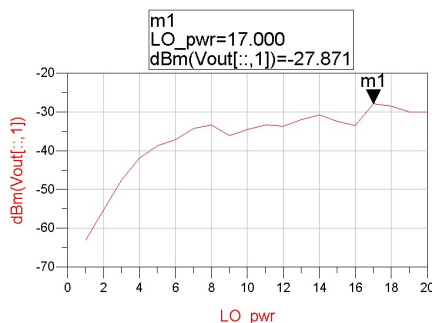


图 6.195 输出信号随本振功率的变化

(6) 由图 6.195 可以看出， $V_{out}$  的输出与本振功率有关，当本振功率为 17dBm 时， $V_{out}$  的输出最大，为 -27.871dBm。

下面是混频器三阶交调仿真

(1) 将原理图 Mixer2 另存为 Mixer3。

(2) 将端口 1 的单频功率源 P\_1Tone 更换为多频功率源 P\_n Tone，对单频功率源 P\_n Tone 设置如下。

- ①  $P[1]=\text{polar}(\text{dbmtow}(-20), 0)$ ，表示第一个基准频率的功率源输出为 -20dBm。
- ②  $P[2]=\text{polar}(\text{dbmtow}(-20), 0)$ ，表示第二个基准频率的功率源输出为 -20dBm。
- ③  $\text{Freq}[1]=(\text{RF\_freq}-\text{fspacing}/2)$  GHz，这表示多频功率源的第一个基准频率。
- ④  $\text{Freq}[2]=(\text{RF\_freq}+\text{fspacing}/2)$  GHz，这表示多频功率源的第二个基准频率。
- ⑤ 其他设置默认不变。

端口 1 的功率源设置如图 6.196 所示。

(3) 对端口 2 单频功率源 P\_1 Tone 重新设置如下。

- ①  $P=\text{polar}(\text{dbmtow}(\text{LO\_pwr}), 0)$ ，表示单频功率源输出信号为变量  $\text{LO\_pwr}$ 。
- ②  $\text{Freq}=\text{LO\_freq}$  GHz，表示本振频率为变量  $\text{LO\_freq}$ 。
- ③ 其他设置默认不变。

端口 2 的功率源设置如图 6.197 所示。

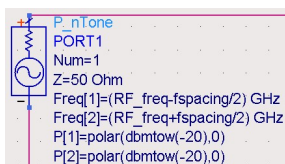


图 6.196 端口 1 的功率源设置

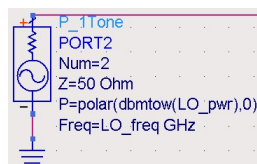


图 6.197 端口 2 的功率源设置

(4) 修改变量控件【VAR】如下。

- ①  $\text{LO\_pwr}=10$ 。

②  $\text{IF\_freq} = \text{RF\_freq} - \text{LO\_freq}$ 。

③  $\text{RF\_freq} = 3.6$ 。

④  $\text{LO\_freq} = 3.8$ 。

⑤  $\text{fspacing} = 0.2\text{e}-3$ 。

完成设置的变量控件【VAR】如图 6.198 所示。

(5) 删掉参数扫描控制器【PARAMETER SWEEP】。

(6) 修改谐波平衡控制器，对谐波平衡控制器设置如下。

①  $\text{Freq}[1] = \text{LO\_freq}$  GHz，这表示谐波平衡仿真的第一个基准频率。

②  $\text{Freq}[2] = (\text{RF\_freq} + \text{fspacing}/2)$  GHz，这表示谐波平衡仿真的第二个基准频率。


③  $\text{Freq}[3] = (\text{RF\_freq} - \text{fspacing}/2)$  GHz，这表示谐波平衡仿真的第三个基准频率。

④  $\text{Order}[1] = 3$ ，表示谐波平衡仿真时第一个基波频率的最大谐波次数为 3。

⑤  $\text{Order}[2] = 3$ ，表示谐波平衡仿真时第二个基波频率的最大谐波次数为 3。

⑥  $\text{Order}[3] = 3$ ，表示谐波平衡仿真时第三个基波频率的最大谐波次数为 3。

谐波平衡控制器设置如图 6.199 所示。

(7) 在原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真。

① 当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入以“dBm”为单位的  $V_{\text{out}}$  的矩形图，显示  $V_{\text{out}}$  的仿真结果，如图 6.200 所示。

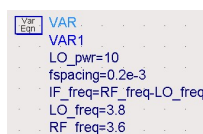


图 6.198 变量控件

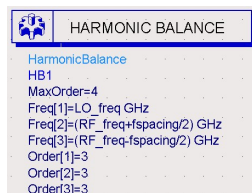


图 6.199 谐波平衡控制器设置

(8) 对图 6.200 更改横轴取值范围， $V_{\text{out}}$  的仿真结果如图 6.201 所示。图中是中频附近的各频率成分。

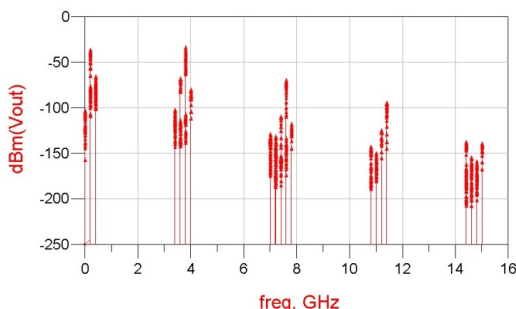


图 6.200 输出信号功率

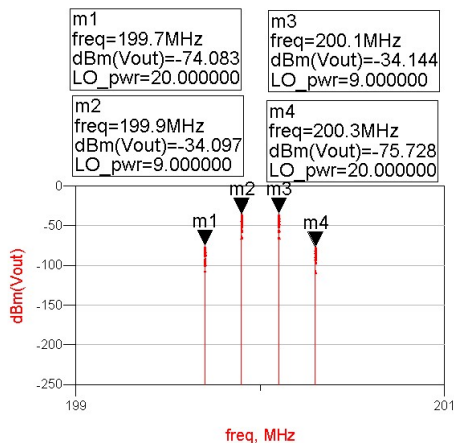


图 6.201 中频附近的各频率成分

(9) 在谐波平衡仿真元器件面板上，选择测量方程控件【Meas Eqn】，插入到原理图中，参数设置如下。

①  $IP3output = ip3\_out(Vout, \{-1, 1, 0\}, \{-1, 2, -1\}, 50)$ , Step=1, 这表示测量输出三交调点的测量方程。

②  $PIFTone = dBm(mix(Vout, \{-1, 1, 0\}))$ , 这表示测量输出中频成分的功率测量方程。

③  $ConvGain = PIFTone + 20$ , 这表示测量混频器转换增益的测量方程。

④  $IP3input = IP3output - ConvGain$ , 这表示测量输入三交调点的测量方程。

设置完成的测量方程控件如图 6.202 所示。

(10) 在谐波平衡仿真元器件面板上, 选择参数扫描控制器 **【PARAMETER SWEEP】**, 插入到原理图中, 参数扫描控制器的参数设置如下。

① SweepVar=“LO\_pwr”, 表示扫描变量为本振功率 LO\_pwr。

② SimInstanceName[1]=“HB1”, 表示扫描的仿真为 HB1。

③ Start=1, 表示扫描的起始值。

④ Stop=20, 表示扫描的终止值。

⑤ Step=1, 表示扫描的间隔值。

设置完成的参数扫描控制器如图 6.203 所示。

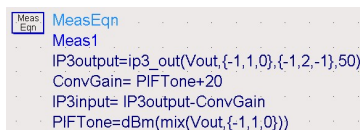


图 6.202 测量方程控件

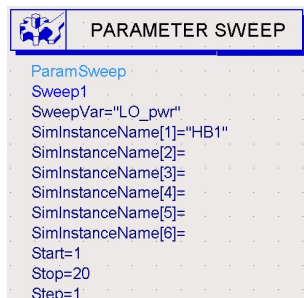



图 6.203 参数扫描控制器

(11) 在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真。

当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入三阶交调图, 如图 6.204 所示。

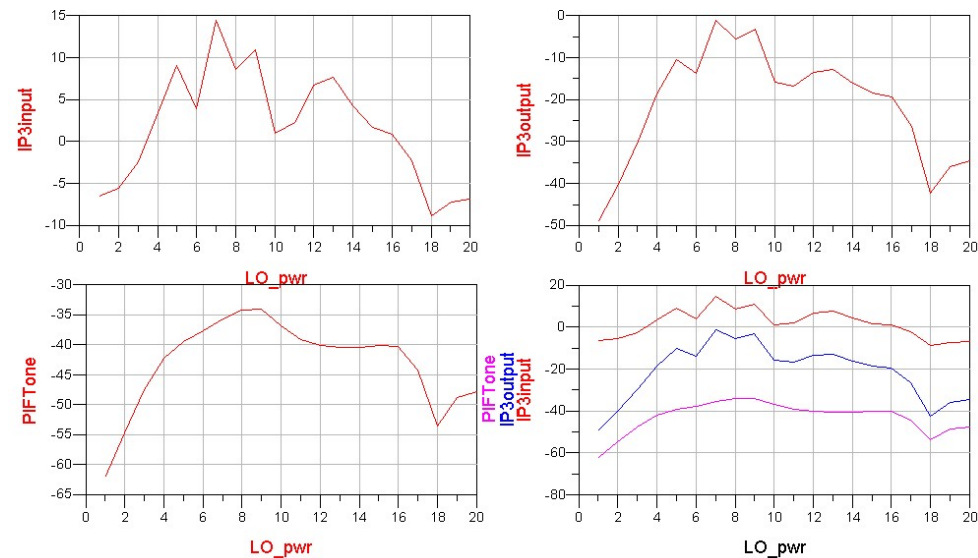


图 6.204 三阶交调图

下面是混频器输入驻波比的仿真

(1) 将原理图 Mixer2 另存为 Mixer5。

(2) 删掉如下元器件。

① 删掉变量控件【VAR】。

② 删掉参数扫描控制器【PARAMETER SWEEP】。

③ 删掉谐波平衡仿真控制器【HB】。

④ 删掉端口 1 的功率源。

⑤ 删掉端口 2 的功率源。

(3) 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上，选择 S 参数仿真控制器 SP，插入原理图中，表明将要做 S 参数仿真。

(4) 双击原理图中的 S 参数仿真控制器，打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框，在对话框中对【Frequency】项进行参数设置。


① 扫描的起始值设为 3.4GHz。

② 扫描的终止值设为 4.2GHz。

③ 扫描的间隔设为 0.1GHz。

④ 其余参数保持默认。

(5) 在 S 参数仿真元件面板上，选择驻波比控件 VSWR，插入到原理图画图区，驻波比控件如图 6.205 所示。

(6) 在原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真。

当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入以 VSWR1 的矩形图，显示 VSWR1 的仿真结果，如图 6.206 所示。

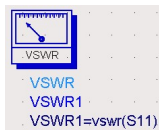


图 6.205 驻波比控件

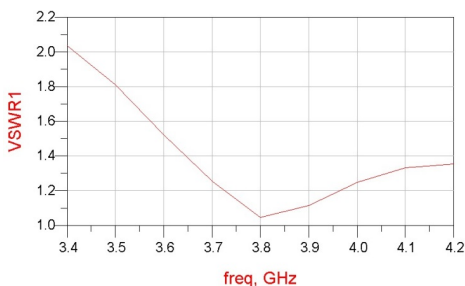


图 6.206 驻波比曲线

由图 6.206 可以看出，端口 1 的驻波系数很小，表明射频端口的反射很小，这正是单平衡混频器的优点之一。

## 6.8 功率分配器

### 6.8.1 功率分配器基本原理

在原理图视窗，ADS 提供了威尔金森功率分配器设计向导，本节应用设计向导学习如何设计功率分配器。通过 ADS 设计向导可以看到，当技术指标不同时，功率分配器的参数和结

构也不同,功率分配器可以是等功率分配的,也可以是不等功率分配的,结构可能是单节的,也可能是多节的。下面介绍威尔金森功率分配器设计向导的使用方法。

### 1. 设计 3dB 单节功率分配器

本设计指标如下。

- 3dB 单节功率分配器。
- 中心频率为 1.8GHz。
- 带宽为 0.4GHz。
- 微带线基板的厚度为 0.5mm。
- 微带线基板的相对介电常数为 4.2。
- 各个端口传输线的特性阻抗采用  $50\Omega$ 。

#### 1) 创建项目

创建一个威尔金森功率分配器项目,本章所有的设计都将保存在这个项目之中。创建项目的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件,弹出主视窗。

(2) 选择主视窗中【File】→【New Workspace】命令,弹出【New Workspace】对话框,如图 6.207 所示。在【New Workspace】对话框中输入项目名称 WDCoupler。

(3) 单击【New Workspace】对话框中的【Finish】按钮,完成创建项目,同时一个未命名的原理图(untitled1)自动打开。

#### 2) 搭建原理图

在前面自动打开的原理图上,搭建电路。

(1) 在未命名的原理图 untitled 1 上,选择【File】→【Save As】命令,弹出【Save Design As】对话框,在【Save Design As】对话框中输入文件名 WDCoupler\_3dB\_1,单击“保存”按钮,将原理图命名为 WDCoupler\_3dB\_1。

(2) 在原理图的元件面板列表上,选择微带线【Mines-Microstrip】,元件面板上出现与微带线对应的元件图标,如图 6.208 所示。

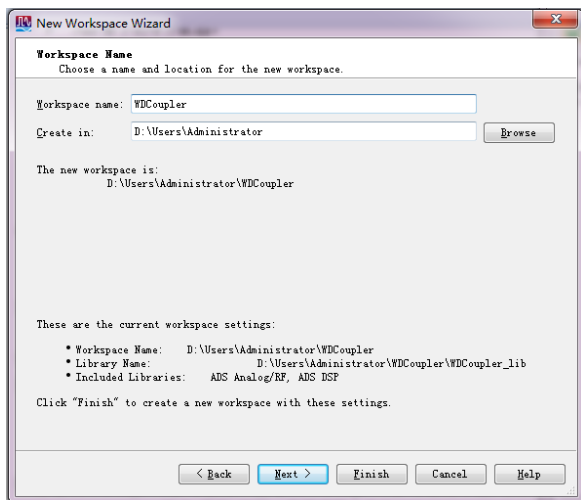


图 6.207 创建一个新项目

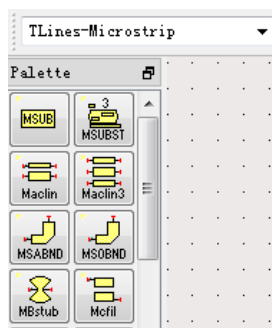


图 6.208 微带线元件面板



(3) 在图 6.208 所示的元件面板上, 单击【MSUB】按钮, 选择微带线参数设置控件, 插入原理图的画图区。

(4) 在原理图的元件面板列表上, 选择耦合器设计向导元件【Passive Circuit DG-Couplers】, 元件面板上出现与【Passive Circuit DG-Couplers】对应的元件图标, 如图 6.209 所示。

(5) 在图 6.209 所示的元件面板上, 单击【WDiv】按钮, 选择威尔金森功率分配器, 插入原理图的画图区。

(6) 插入微带线参数设置控件【MSUB】和威尔金森功率分配器【WDiv】后, 原理图画图区如图 6.210 所示, 图中威尔金森功率分配器显示为 WDCoupler。

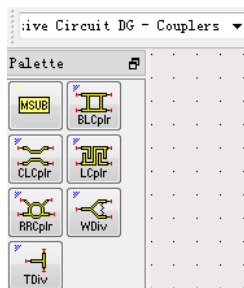


图 6.209 耦合器设计向导元件面板图

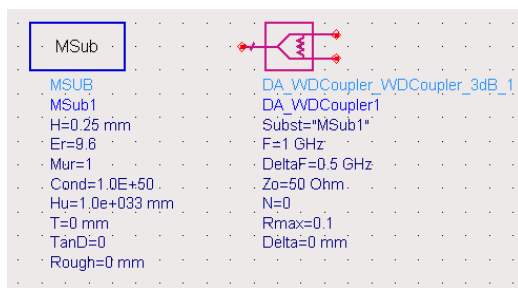


图 6.210 没有设置参数的电路原理图

### 3) 设置微带线参数

在图 6.210 所示的画图区中, 双击【MSUB】, 弹出【Microstrip Substrate】对话框。在【Microstrip Substrate】对话框中, 对微带线参数设置如下。

- (1)  $H=0.5\text{ mm}$ , 表示微带线基板的厚度为  $0.5\text{ mm}$ 。
- (2)  $Er=4.2$ , 表示微带线基板的相对介电常数为  $4.2$ 。
- (3)  $Mur=1$ , 表示微带线的相对磁导率为  $1$ 。
- (4)  $Cond=4.1E+7$ , 表示微带线导体的电导率为  $4.1E+7$ 。
- (5)  $Hu=1.0e+033\text{ mm}$ , 表示微带线的封装高度为  $1.0e+033\text{ mm}$ 。
- (6)  $T=0.05\text{ mm}$ , 表示微带线的导体层厚度为  $0.05\text{ mm}$ 。
- (7)  $TanD=0.0003$ , 表示微带线的损耗角正切为  $0.0003$ 。
- (8)  $Rough=0\text{ mm}$ , 表示微带线表面粗糙度为  $0\text{ mm}$ 。

完成设置的微带线 MSUB 控件如图 6.211 所示。

### 4) 设置威尔金森功率分配器参数

在图 6.209 所示的画图区中, 双击【WDCoupler】电路, 弹出【Wilkinson Power Divider】对话框, 对 WDCoupler 电路参数设置如下。

- (1)  $Subst=$  “MSub1”, 表示微带线的参数由 MSub 1 决定。
- (2)  $F=1.8\text{ GHz}$ , 表示功率分配器的中心频率为  $1.8\text{ GHz}$ 。
- (3)  $DeltaF=0.4\text{ GHz}$ , 表示频率带宽为  $0.4\text{ GHz}$ 。
- (4)  $Zo=50\text{ Ohm}$ , 表示功率分配器三个端口传输线的特性阻抗为  $50\Omega$ 。
- (5)  $N=0$ , 表示功率分配器初始设置为  $0$  节, 计算后决定  $N$  的数值。
- (6)  $Rmax=0.1$ , 表示输入端口 (端口 1) 电压反射系数最大值为  $0.10$ 。
- (7)  $K=1.0$ , 表示两个输出端口 (端口 2 和端口 3) 输出功率的比值为  $1.0$ 。
- (8)  $Wgap=1.25\text{ mm}$ , 表示电阻的宽度为  $1.25\text{ mm}$ 。

(9)  $\Delta=0\text{mm}$ ，表示用于调谐的分支长度增加量为  $0\text{ mm}$ 。

完成设置的功率分配器电路参数如图 6.212 所示。

#### 5) 使用 ADS 软件的设计向导

前面仅对功率分配器的频率、阻抗和反射系数等参数进行了设置，并没有根据这些参数确定它的结构和尺寸，结构和尺寸需要使用 ADS 的设计向导完成。

(1) 在画图区选中 WDCoupler 电路，并选择【Design Guide】→【Passive Circuit】命令，弹出【Passive Circuit】对话框。在【Passive Circuit】对话框中选择【Microstrip Control Window】选项，然后单击【OK】按钮，弹出【Passive Circuit Design Guide】窗口。

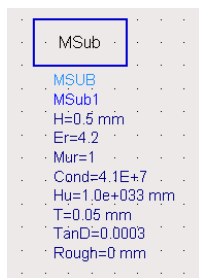


图 6.211 微带线参数设置

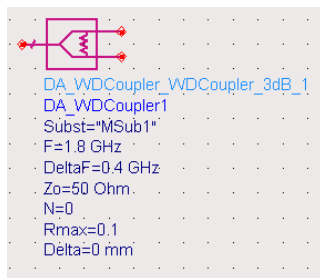


图 6.212 威尔金森功率分配器参数设置

(2) 选择【Passive Circuit DesignGuide】窗口中的【Design Assistant】选项，如图 6.213 所示，单击【Design】按钮，系统将自动完成设计过程。

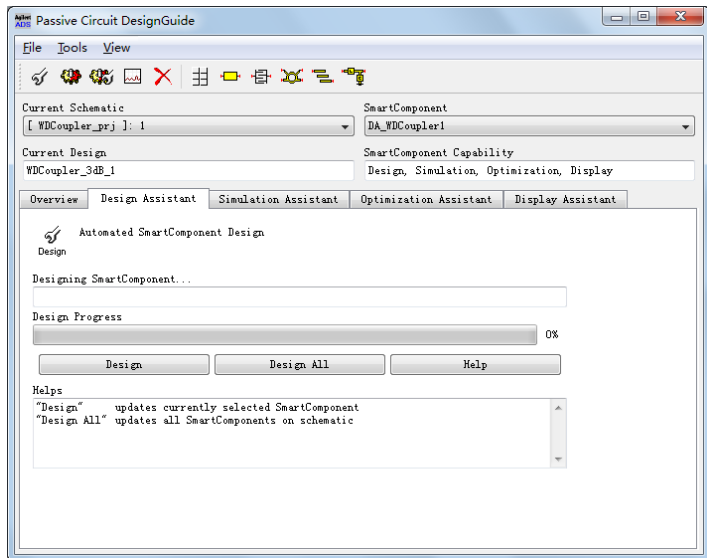


图 6.213 设计向导中的【Design Assistant】选项

(3) 设计自动完成后，在画图区选中 WDCoupler 电路，单击工具栏中的【Push Into Hierarchy】按钮，进入 WDCoupler 子电路，如图 6.214 所示，图中给出了功率分配器的结构和尺寸。

图 6.214 中画出了微带结构的功率分配器原理图，原理图中所有元件都可以从子电路左侧的微带线元件面板上看到元件模型，其中使用了微带线元件面板上的传输线元件（MLIN），T 形接头元件（MTEE）和弧形微带线（MCURVE）等。



单击子电路工具栏中的【Pop Out】按钮，退出 WDCoupler 子电路。

(4) 选择【Passive Circuit DesignGuide】窗口中的【Simulation Assistant】选项，设置频率如下。

- Start=1.6GHz。
- Stop=2.0GHz。
- Step=10MHz。

设置完成的【Simulation Assistant】选项如图 6.215 所示。

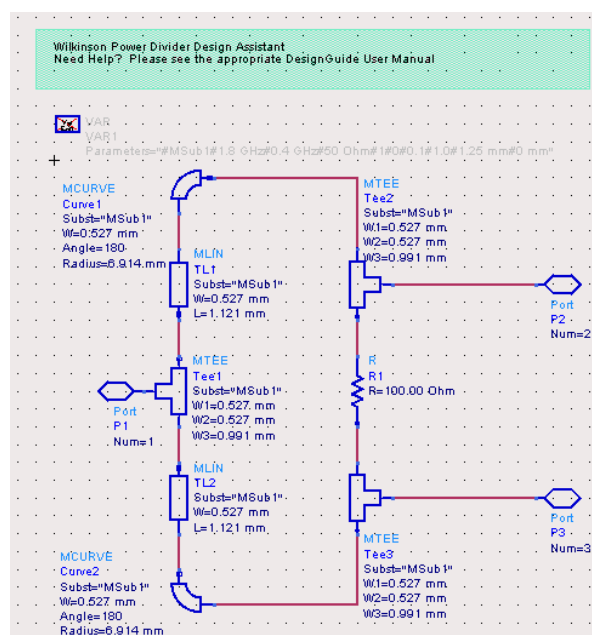


图 6.214 单节等功率分配器原理图

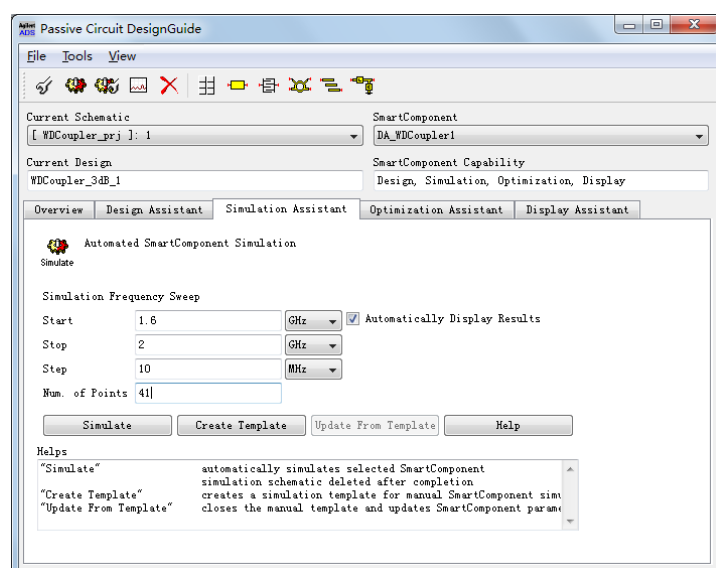


图 6.215 设计导向中的【Simulation Assistant】选项

(5) 单击图 6.215 中的【Simulate】按钮，系统将自动完成仿真过程，并弹出数据显示视窗，显示仿真结果，如图 6.216 所示。

图 6.216 使用模板显示了输入端口的驻波比和反射系数、两个输出端口的反射系数、两个输出端口之间的隔离度和输入到输出的分配损耗等。

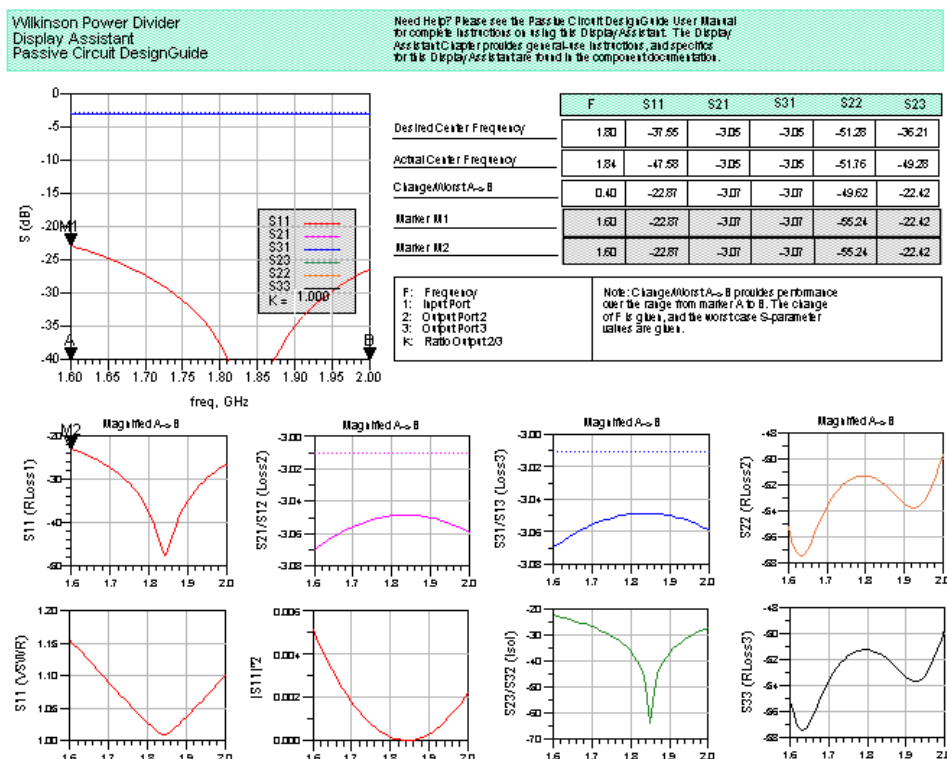


图 6.216 单节等功率分配器仿真数据

## 6.8.2 设计实现功率分配器

前面由 ADS 的设计向导，得到了威尔金森功率分配器的原理图，并由原理图生成了版图，全面认识了功率分配器的基本结构和仿真数据。本节将设计一个功率分配器，在设计的过程中，将功率分配器的尺寸设为变量，然后优化仿真结果，通过优化实现技术指标。

设计指标如下。

- 3dB 单节功率分配器。
- 中心频率为 1.8GHz。
- 工作频率为 1.6~2.0GHz。
- 工作频率内 S11 小于 -20dB。
- 工作频率内 S21 大于 -3.1dB。
- 工作频率内 S22 和 S23，小于 -10dB。
- 微带线基板的厚度为 0.5mm。
- 微带线基板的相对介电常数为 4.2。
- 各个端口传输线的特性阻抗采用 50Ω。

## 1. 创建新设计

创建一个新设计，这个设计依旧保存 WDCoupler 项目之中。创建新设计的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗。

(2) 选择主视窗中的【View】→【Startup Hierarchies】命令，然后在主视窗中的文件浏览区选择【WDCoupler\_prj】，双击进入 WDCoupler 项目。

(3) 在主视窗中选择【File】→【New Schematic】命令，弹出【New Schematic】对话框，在【New Schematic】对话框中，输入新建的设计名称 WDCoupler\_1，并选择对话框中的【Schematic Design Templates】（原理图设计模板）中的【none】，然后单击【OK】按钮。

(4) 新建设计 WDCoupler\_1 的原理图自动打开。

## 2. 设计原理图

下面在 WDCoupler\_1 的原理图上，搭建原理图电路并设置参数。

### 1) 设置微带线参数

(1) 在原理图的元件面板列表上，选择微带线【TLines-Microstrip】，元件面板上出现与微带线对应的元件图标，在微带线元件面板上，单击【MSUB】按钮，选择微带线参数设置控件，插入原理图的画图区。

(2) 在画图区中双击【MSUB】，弹出【Microstrip Substrate】对话框，对微带线参数设置如下。

- ①  $H=0.5\text{mm}$ ，表示微带线基板的厚度为 0.5mm。
- ②  $\epsilon_r=4.2$ ，表示微带线基板的相对介电常数为 4.2。
- ③  $\mu_r=1$ ，表示微带线的相对磁导率为 1。
- ④  $\text{Cond}=4.1\text{E}+7$ ，表示微带线导体的电导率为  $4.1\text{E}+7$ 。
- ⑤  $H_u=1.0\text{e}+033\text{mm}$ ，表示微带线的封装高度为  $1.0\text{e}+033\text{mm}$ 。
- ⑥  $T=0.05\text{ mm}$ ，表示微带线的导体层厚度为 0.05mm。
- ⑦  $\text{TanD}=0.000\ 3$ ，表示微带线的损耗角正切为 0.0003。
- ⑧  $\text{Rough}=0\text{mm}$ ，表示微带线表面粗糙度为 0mm。

### 2) 利用 ADS 软件中的工具 Tools 计算微带线的尺寸

ADS 软件中的工具 Tools，可以对不同类型的传输线进行计算。对于微带线来说，可以进行物理尺寸和电参数之间的数值计算，例如，若给定微带线的特性阻抗，可以计算微带线的宽度。下面利用工具 Tools，对微带线进行计算。

(1) 在 WDCoupler\_1 原理图上，选择【Tools】→【LineCalc】→【Start LineCalc】命令，弹出【LineCalc】计算窗口，如图 6.217 所示。

(2) 在【LineCalc】计算窗口，计算功率分配器支路的宽度和长度，也即计算特性阻抗为  $50\Omega$ 、长度为  $\lambda/4$ （ $90^\circ$  相移）传输线的宽度和长度。在【LineCalc】计算窗口选择如下。

- ① Type 选择为 MLIN，意为计算微带线。
- ②  $\epsilon_t=4.2$ ，表示微带线基板的相对介电常数为 4.2。
- ③  $\mu_t=1$ ，表示微带线的相对磁导率为 1。
- ④  $H=0.5\text{mm}$ ，表示微带线基板的厚度为 0.5mm。
- ⑤  $H_u=1.0\text{e}+033\text{mm}$ ，表示微带线的封装高度为  $1.0\text{e}+033\text{mm}$ 。
- ⑥  $T=0.05\text{mm}$ ，表示微带线的导体层厚度为 0.05mm。

- ⑦ Cond=4.1E+7, 表示微带线导体的电导率为 4.1E+7。
- ⑧ TanD=0.000 3, 表示微带线的损耗角正切为 0.0003。
- ⑨ Rough=0mm, 表示微带线表面粗糙度为 0mm。
- ⑩ Freq=1.8GHz, 表示计算时采用中心频率, 也即采用 1.8GHz
- ⑪ ZO=70.71 Ohm, 表示计算时特性阻抗采用  $50\sqrt{2}\Omega$ , 也即采用 70.71 $\Omega$ 。
- ⑫ E\_Eff=90deg, 表示计算时微带线长度采用  $\lambda/4$ , 也即采用 90° 相移。

上述设置完成后, 单击【LineCalc】计算窗口中的【Synthesize】按钮, 在【LineCalc】窗口中显示出计算结果如下。

- W=0.48mm, 表示微带线的宽度为 0.48mm。
- L=24.33mm, 表示微带线的长度为 24.33mm。

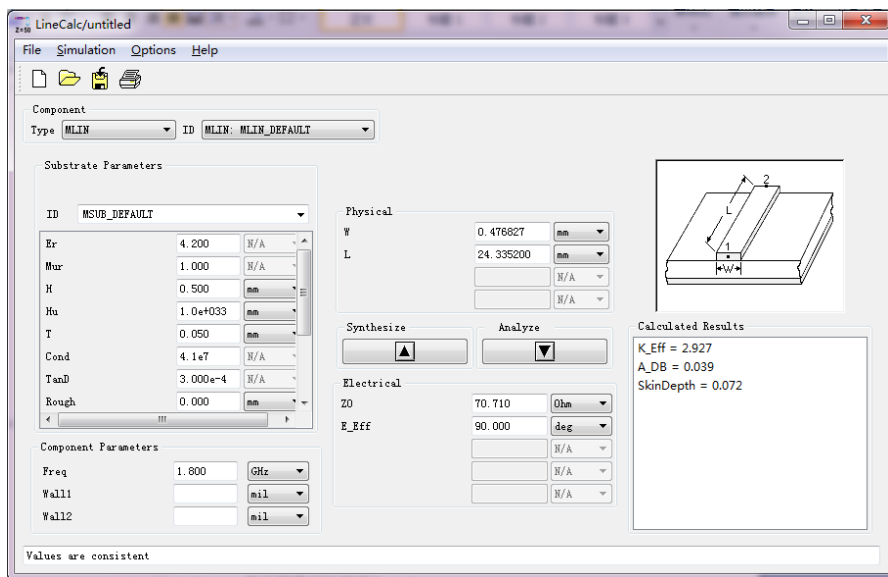


图 6.217 微带线尺寸计算窗口

(3) 在【LineCalc】计算窗口, 计算 50 $\Omega$  系统微带线的宽度, 也即计算特性阻抗为 50 $\Omega$  的微带线宽度。在【LineCalc】计算窗口选择如下。

- ① ZO=50Ohm, 表示计算时特性阻抗采用 50 $\Omega$ 。
- ② 其余各选项与 (2) 相同。

上述设置完成后, 单击【LineCalc】计算窗口中的【Synthesize】按钮, 在【LineCalc】窗口中显示出计算结果如下。

W=0.94mm, 表示微带线的宽度为 0.94mm。

这里需要说明的是, 微带线的宽度选为 0.94mm 是近似值, 其对应的特性阻抗近似等于 50 $\Omega$ 。下面利用 ADS 软件中的工具 Tools, 计算宽度为 0.94mm 的微带线的特性阻抗。

- ① 单击原理图上的 TL1, 表示要计算 TL1 的电参数。
- ② 然后选择【Tools】→【LineCalc】→【Send Selected Component To LineCalc】命令, 经过几秒钟的计算后, 弹出【LineCalc】窗口。
- ③ 【LineCalc】窗口显示宽度为 0.94mm 的微带线的特性阻抗等于 50.133 1 $\Omega$ , 如图 6.218 所示。

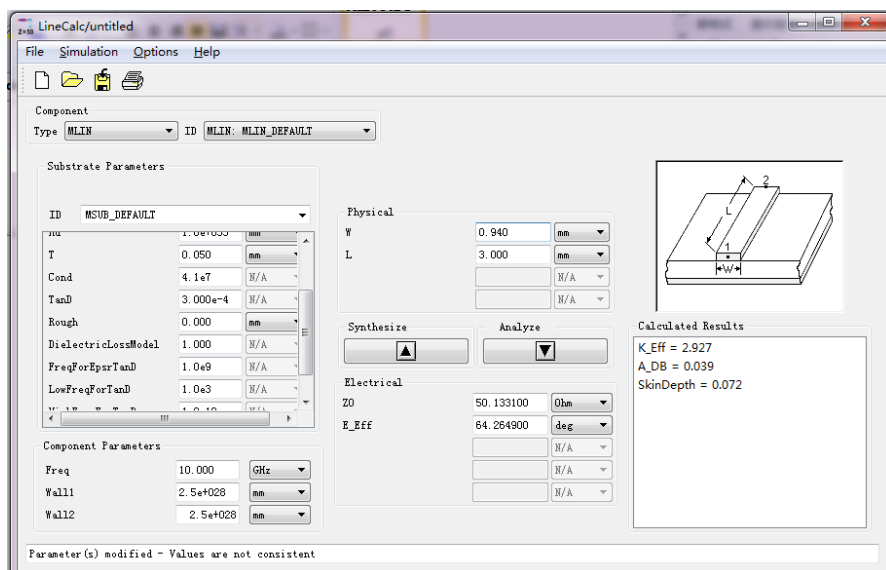


图 6.218 微带线电参数计算窗口

### 3) 搭建电路

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择微带线【TLines-Microstrip】, 元件面板上出现与微带线对应的元件图标, 在微带线元件面板上选择【MLIN】和【WTEE】, 插入到原理图的画图区, 搭建输入端口。双击【MLIN】, 在弹出的设置窗口中设置  $W=0.94\text{mm}$  和  $L=3\text{mm}$ 。双击【MTEE】, 在弹出的设置窗口中设置  $W1=w\text{mm}$ 、 $W2=w\text{mm}$  和  $W3=0.94\text{mm}$ 。设置完成的输入端口如图 6.219 所示。

(2) 在微带线元件面板上选择 3 个【MLIN】、2 个【MCURVE】和 1 个【MTEE】, 插入到原理图的画图区, 并将它们连接起来, 构成功率分配器的一个支路。分别双击画图区的【MLIN】, 【MCURVE】和【MTEE】, 设置它们的数值, 设置完成的电路如图 6.220 所示。这里需要说明的是, 支路的宽度设为变量  $W$ , 1 个【MLIN】的长度设为变量  $L$ ,  $W$  和  $L$  的数值用于优化。

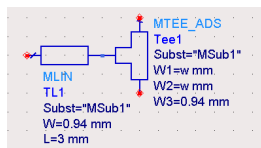


图 6.219 功率分配器输入端口

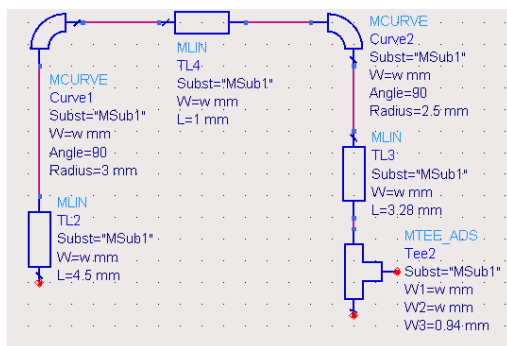


图 6.220 功率分配器的一个支路

(3) 在微带线元件面板上选择 3 个【MLIN】、2 个【MCURVE】和 1 个【MTEE】, 插入到原理图的画图区, 用同样的方法搭功率分配器另一个支路的原理图, 如图 6.221 所示。

(4) 将前面搭建的电路连接起来, 并在两个支路中间插入电阻  $R$ , 选择电阻  $R=100\Omega$ 。设置完成的原理图如图 6.222 所示。

(5) 在微带线元件面板上选择 3 个【MLIN】和 2 个【MCURVE】, 插入到原理图的画图区,

并将它们连接起来，构成功率分配器的一个输出端口。分别双击画图区的【MLIN】和【MCURVE】，设置它们的数值，设置完成的电路如图 6.223 所示。

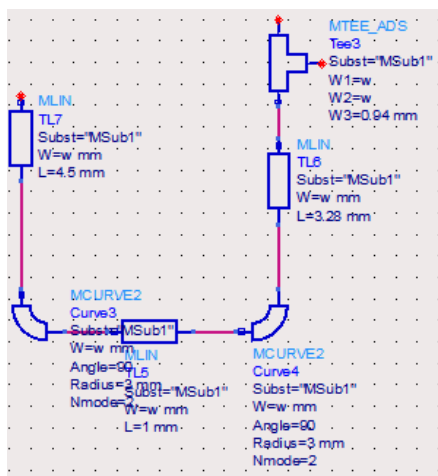


图 6.221 功率分配器的另一个支路

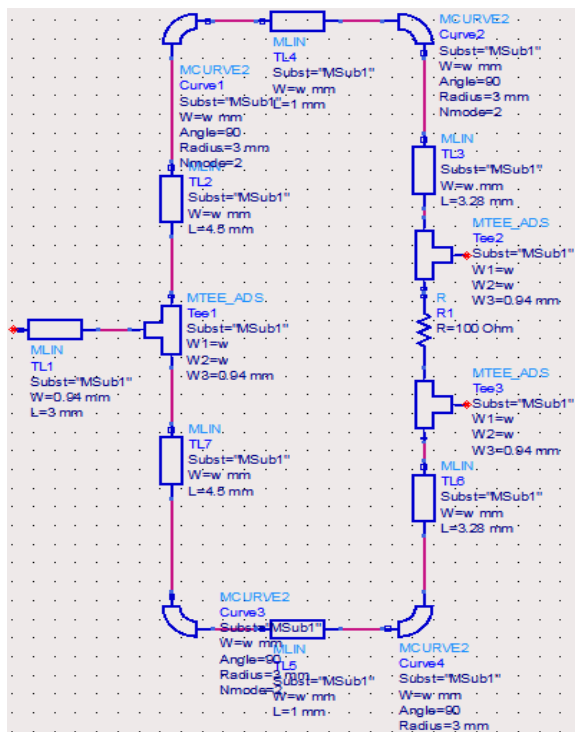


图 6.222 不带输出端口的功率分配器原理图

(6) 在微带线元件面板上选择 3 个【MLIN】和 2 个【MCURVE】，插入原理图的画图区，并将它们连接起来，构成功率分配器的另一个输出端口。同样设置它们的数值，设置完成的电路如图 6.224 所示。

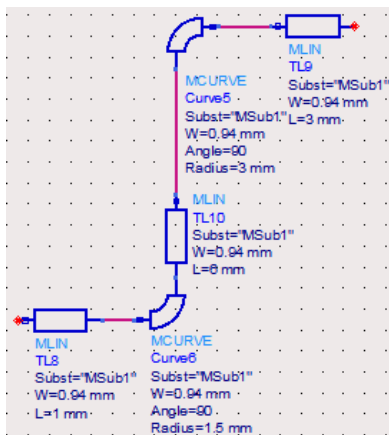


图 6.223 功率分配器的一个输出端口

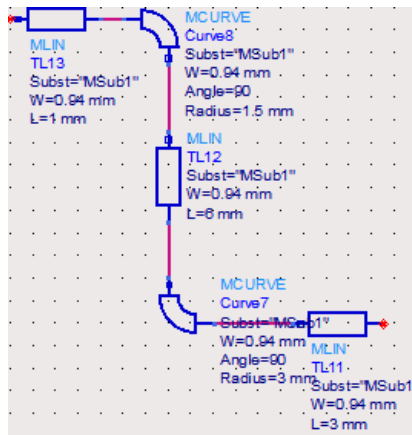


图 6.224 功率分配器的另一个输出端口

(7) 至此功率分配器的原理图已经搭建完成，将它们连接起来，构成功率分配器原理图电路，如图 6.225 所示。

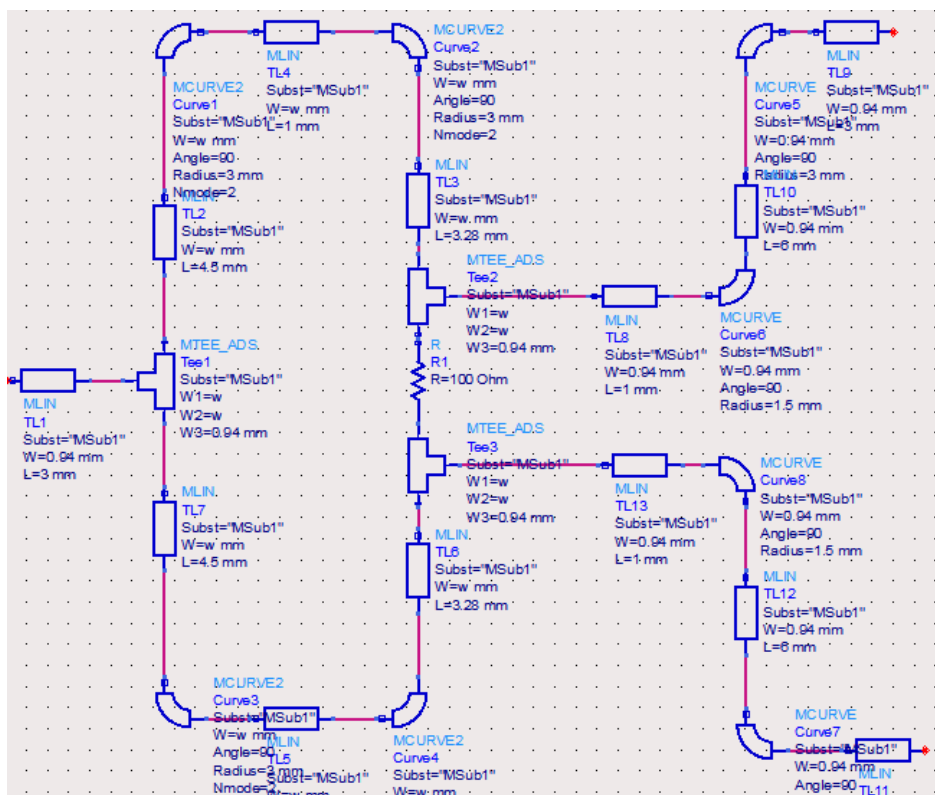


图 6.225 带有两个输出端口的功率分配器

### 3. 对于原理图优化

在优化与仿真之前，首先设置变量控件 VAR，VAR 对原理图中的变量 W 和 L 给出优化取值范围。优化的目标有 4 个，分别是端口 1 和端口 2 的匹配状况、功率分配器的正向传输系数和两个输出端口之间的隔离度。当变量控件 VAR 和优化目标确定后，就可以仿真了。

#### 1) 设置变量 VAR 控件

(1) 在原理图的工具栏，选择变量【VAR】按钮，插入到原理图的画图区。

(2) 在画图区中双击 VAR，弹出【Variables and Equations】对话框，在对话框中对变量参数 W 和 L 进行设置。

(3) 对变量 W 设置如下。

① 在【Name】栏填入 W。

② 在【Variable Value】栏填入 0.48mm。

③ 单击【Tune/Opt/Stat/DOE Setup】按钮，打开【Setup】设置窗口，在【Setup】窗口中，选择优化【Optimization】按钮，然后在【Optimization Status】栏选择【Enabled】，在【Type】栏选择【Continuous】，在【Format】栏选择【min/max】，在【Minimum Value】栏填入“0.38mm”，在【Maximum Value】栏填入“0.58mm”，单击【OK】按钮结束设置。完成设置的【Variables and Equations】和【Setup】参数如图 6.226 所示。

(4) 用同样的方法设置变量 L。

(5) 设置完成的 VAR 控件如图 6.227 所示。

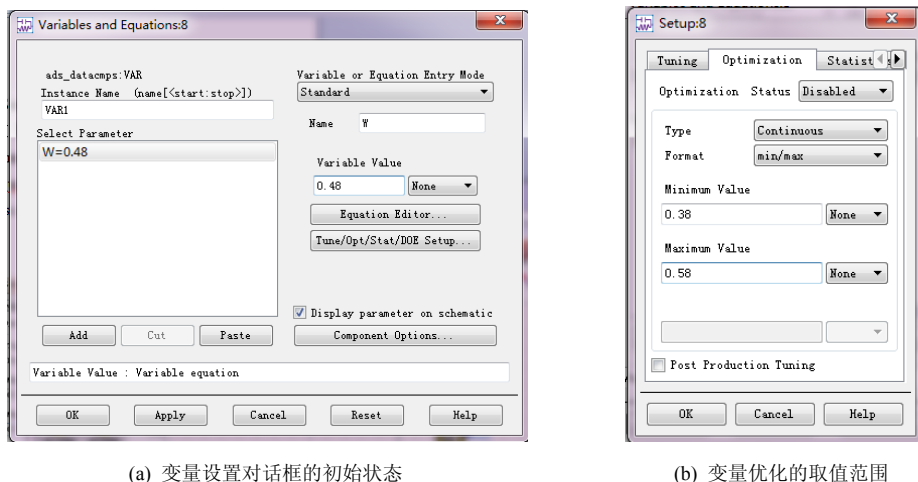


图 6.226 变量参数设置

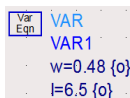


图 6.227 变量控件

## 2) 设置优化控件

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择优化元件【Optim/Stat/Yield/DOE】, 元件面板上出现与【Optim/Stat/Yield/DOE】对应的元件图标。在元件面板上选择优化控件【Optim】, 插入原理图的画图区。在元件面板上选择目标控件 Goal, 插入到原理图的画图区, 共插入 4 个目标控件 Goal。

(2) 双击画图区的优化控件【Optim】, 设置优化控件。

- ① 选择随机 Random 优化方式。
- ② 优化次数选择 50 次。
- ③ 其余的选项保持默认状态。

(3) 下面设置 4 个目标控件 Goal, 这 4 个目标控件分别用来控制  $S(1, 1)$ ,  $S(2, 2)$ ,  $S(2, 1)$  和  $S(2, 3)$ , 其中  $S(1, 1)$  和  $S(2, 2)$  表示端口 1 和端口 2 的匹配状况,  $S(2, 1)$  表示功率分配器正向传输系数,  $S(2, 3)$  表示两个输出端口之间的隔离度。

(4) 双击目标控件 1, 选择如下。

- ① 选择 Expr 为  $\text{dB}(S(1, 1))$ 。
- ② 选择 Max 为 -25。
- ③ 选择 RangeVar[1] 为 freq。
- ④ 选择 RangeMin[1] 为 1.6GHz。
- ⑤ 选择 RangeMax[1] 为 2.0GHz。
- ⑥ 其余的选项保持默认状态。

这表示这个目标控件用来控制  $S(1, 1)$ , 希望  $S(1, 1)$  的最大值为 -25dB, 频率扫描范围为 1.6~2.0GHz。

(5) 用同样的方法设置其余 3 个目标控件, 设置完成的目标控件如表 6.1 所示。

设置完成的优化控件 Optim 和目标控件 Goal 如图 6.228 所示。

## 3) 原理图仿真与数据显示

下面对原理图仿真, 并在数据显示视窗显示仿真结果。



表 6.1 设置 4 个目标控件

按钮名称	优化目标 1	优化目标 2	优化目标 3	优化目标 4
Expr	dB ( S ( 1 , 1 ) )	dB ( S ( 2 , 2 ) )	dB ( S ( 2 , 1 ) )	dB ( S ( 2 , 3 ) )
SimInstanceName	SP1	SP1	SP1	SP1
Weight	保留	保留	保留	保留
Min	保留	保留	保留	保留
Max	-25	-25	保留	-25
RangeVar	freq	freq	freq	freq
RangeMin	1.6GHz	1.6GHz	1.6GHz	1.6GHz
RangeMax	2.0GHz	2.0GHz	2.0GHz	2.0GHz

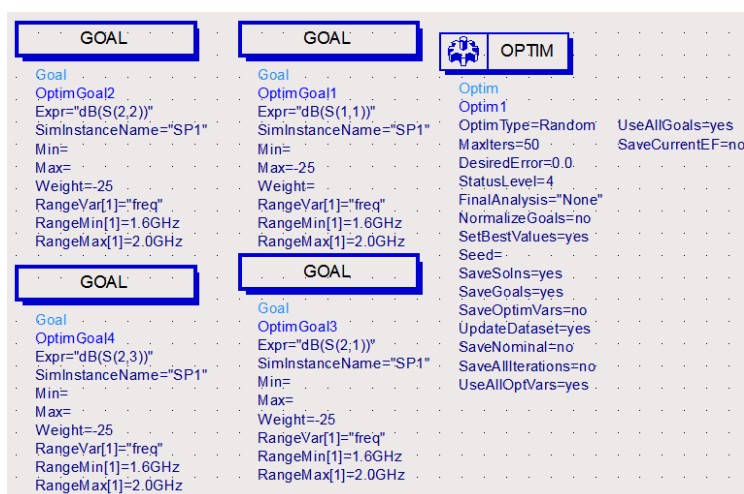


图 6.228 优化控件和目标控件

(1) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控件 SP, 插入画图区中。双击画图区中的 SP, 在弹出的设置窗口中设置如下。

- ① 频率扫描类型选为 Linear。
- ② 频率扫描的起始值为 1.6GHz。
- ③ 频率扫描的终止值为 2.0GHz。
- ④ 频率扫描的步长为 10MHz。

设置完成的 S 参数仿真控件如图 6.229 所示。

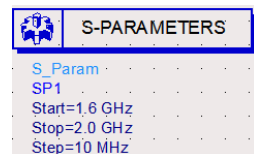


图 6.229 S 参数仿真控件

(2) 现在可以对原理图仿真了。在原理图工具栏中单击仿真【Simulate】图标, 运行仿真, 仿真过程中弹出了仿真状态窗口, 记录了频率扫描范围和仿真花费的时间等。

(3) 仿真结束后, 选择【Simulate】→【Update Optimization Values】命令, 将优化后的变量值 W 和 L 保存在原理图中。

(4) 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。在数据显示视窗用矩形图表示 S11 曲线, 矩形图横轴的频率范围为 1.6~2.0GHz, 纵轴为 S11, S11 是用分贝 (dB) 表示的。

(5) 用同样的方法可以给出 S22、S21 和 S23 曲线, 可以看出, S11、S22、S21 和 S23 曲线满足技术指标。

## 6.9 压控振荡器

在射频电路设计中,经常涉及压控振荡器的运用。本节将设计一个压控振荡器,其振荡频率为 1.8GHz,让读者学习如何利用 ADS 元器件库选取振荡器的晶体管和变容二极管、如何设计晶体管振荡器、如何设计振荡器的偏置电路以及如何仿真振荡器的各种参数。

### 6.9.1 压控振荡器基本原理

下面将创建一个压控振荡器的原理图,并完成在 ADS 元器件库选取振荡器的晶体管和变容二极管的工作。

#### 1. 创建原理图

使用主视窗创建项目,项目命名为 Oscillator。


选择主视窗中的【File】→【New Design】命令,弹出【New Design】对话框,在【New Design】对话框中,做如下设置。

- (1) 输入新建原理图的名称为 VCO-1。
- (2) 选择【Schematic Design Templates】为【none】。
- (3) 单击【OK】按钮,完成创建原理图的工作。

#### 2. 利用 ADS 元器件库选取晶体管和变容二极管

在 ADS 软件元器件库中选取振荡器的晶体管,这里的晶体管选取“41411”。

在 ADS 软件元器件库中选取振荡器的变容二极管,这里的变容二极管选取“1404”。选取变容二极管的步骤如下。

- (1) 单击原理图工具栏中的按钮,打开元器件库。
- (2) 在元器件库窗口中单击【Find Component】按钮,系统弹出元器件搜索窗口。
- (3) 在元器件搜索窗口中输入元器件名称“1404”,然后单击【Apply】按钮查找,查找结束后,在元器件库窗口中可以看到这种二极管的不同模型。如图 6.230 所示。
- (4) 本设计采用的二极管模型为 aq\_dio\_MV1404\_19930601。

实现振荡器偏置电路,对封装模型的仿真是指对元器件库中 pb 模型的仿真,对封装模型的仿真需要考虑偏置网络的问题,本小节将利用 pb 模型元器件库 pb\_hp\_19921101 设计振荡器的偏置电路。

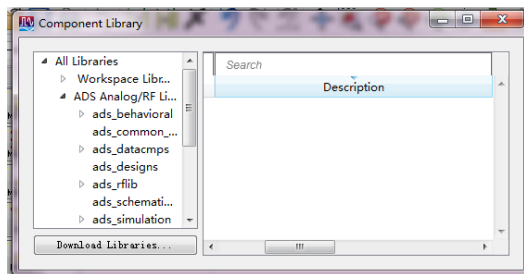


图 6.230 元器件库窗口

#### 1. 偏置电路设计的指标

本设计指标如下。

- (1)  $V_{ce}=6V$ 。
- (2)  $I_c=10mA$

#### 2. 搭建偏置电路

- (1) 打开原理图 VOC-1。
- (2) 在元器件库中选择 pb 模型元器件库 pb\_hp\_19921101,插入到原理图中。
- (3) 在原理图的元件面板列表上,选择频域源【Sources-Freq Domain】项,在频域源元件

面板上, 选择直流电压源 V\_DC, 2 次插入原理图中。直流电压源分别设置如下。

① 直流电压源 SRC1 设置为  $V_{dc} = -5V$ 。

② 直流电压源 SRC2 设置为  $V_{dc} = 12V$ 。

(4) 在原理图的元件面板列表上, 选择集总参数元件【Lumped-Components】项, 在集总参数元件面板上, 选择电阻 R, 2 次插入原理图中。电阻值分别设置如下。


①  $R1 = 200\Omega$ 。


② 将 R1 的电阻值设置为可优化, 优化范围为  $100 \sim 600\Omega$ 。

③  $R2 = 400\Omega$ 。

④ 将 R2 的电阻值设置为可优化, 优化范围为  $0 \sim 200\Omega$ 。

(5) 在原理图的元件面板列表上, 选择探测元器件【Probe Components】, 元器件面板上出现与探测对应的元器件图标。在探测元器件面板上, 选择 I\_Probe 元器件插入到原理图中, I\_Probe 元器件指的是电流指示表, 用来指示插入点处的电流。

(6) 在原理图工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 插入原理图, 让 2 个直流电压源 V\_DC 接地。

(7) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的晶体管、2 个直流电压源 V\_DC、2 个电阻和电流指示表 I\_Probe 连接起来。

(8) 在原理图中插入 2 个节点。

① 在原理图电流指示表和晶体管之间的连线上, 插入节点 Vcb。

② 在原理图晶体管和电阻 R1 之间的连线上, 插入另一个节点 Veb。

(9) 在原理图的元件面板列表上, 选择优化元器件【Optim/Stat/Yield/DOE】项, 在优化元器件面板上, 选择优化控件【Optim】插入到原理图画图区, 并选择目标控件【Goal】插入到原理图画图区, 共插入 2 个目标控件【Goal】。

(10) 双击画图区的优化控件【Optim】, 打开【Nominal Optimization】窗口, 在【Nominal Optimization】窗口中设置优化控件, 设置优化控件的步骤如下。

① 选择随机【Random】优化方式。

② 优化次数选择 100 次。

③ 其他选项默认不变。

(11) 设置目标控件 Goal 如下。

双击目标控件【Goal 1】, 设置参数。

① 选择 Expr 为 “I\_Probe 1.i”, 表示目标控件的期望值为电流表的指示值。

② 选择 SimInstanceName = “DC1”, 表示仿真控件选为 DC1。

③ 选择 Min =  $9.99e-3$ , 表示期望电流表的指示最小值为 9.99mA。

④ 选择 Max =  $10.1e-3$ , 表示期望电流表的指示最小值为 10.1mA。

⑤ 其他选项默认不变。

双击目标控件【Goal 2】, 设置参数。

① 选择 Expr 为 “Vcb”, 表示目标控件的期望值为 Vcb。

② 选择 SimInstanceName = “DC1”, 表示仿真控件选为 DC1。


③ 选择 Min = 5.18, 表示 Vcb 电压值的最小值为 5.18V。

④ 选择 Max = 5.25, 表示 Vcb 电压值的最大值为 5.25V。

⑤ 其他选项默认不变。

原理图中完成设置的优化控件和目标控件如图 6.231 所示。

(12) 在原理图的元件面板列表上, 选择直流仿真【Simulation-DC】项, 在直流仿真元器件面板上, 选择直流仿真控制器 DC, 插入到原理图中。

(13) 在原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。当仿真结束后, 在原理图的各个节点上, 可以查看电压和电流值, 查看的步骤如下。

① 在原理图视窗中, 选择【Simulate】→【Annotate DC Solution】命令。

② 原理图上会自动显示各个节点处的电压和电流值, 这时偏置原理图如图 6.232 所示, 可以看出偏置电路满足技术指标。

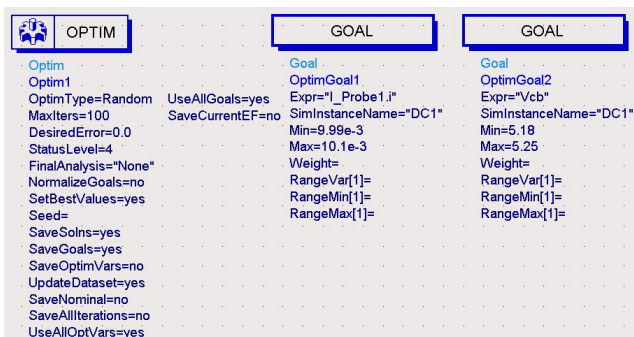


图 6.231 完成设置的优化控件和目标控件

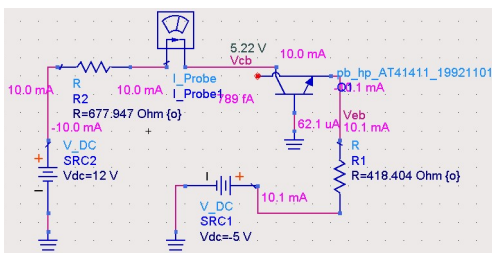


图 6.232 偏置电路上各节点的电压和电流值

③ 在原理图上, 选择【Simulate】→【Clear DC Annotate】命令, 可以清除原理图上各个节点处电压和电流的标值。

(14) 仿真结束后, 选择【Simulate】→【Update Optimization Values】命令, 将优化后的值保存在原理图中, 优化后的电阻值如下。

①  $R1 = 390.733\Omega$ 。表示  $R1$  的优化后的电阻值为  $418.404\Omega$ 。

②  $R2 = 631.729\Omega$ 。表示  $R2$  的优化后的电阻值为  $677.947\Omega$ 。

## 6.9.2 设计实现振荡器

本小节将利用 pb 模型元器件库 pb\_hp\_AT41411\_19921101 设计振荡器。设计振荡器需要考虑如下三部分构成。

- 振荡器的偏置电路。
- 振荡器的调谐网络。振荡器的调谐网络采用二极管 ap\_dio\_MV1404\_19930601, 该二极管的电容值随外加电压值的变化而变化, 使得振荡器的调谐频率可调, 因此压控振荡器也可称为可调谐振荡器。
- 振荡器的终端网络。

下面利用二极管元器件 p\_dio\_MV1404\_19930601 和晶体管元器件 pb\_hp\_AT41411\_19921101 搭建振荡器电路。

### 1. 调谐网络的设计

(1) 新建原理图 VOC-2。

(2) 在元器件库中选择二极管元器件 p\_dio\_MV1404\_19930601, 插入到原理图中。

(3) 在原理图的元件面板列表上, 选择频域源【Sources-Freq Domain】项, 在频域源元件


面板上, 选择直流电压源 V\_DC, 插入原理图中。直流电压源设置如下。


直流电压源设置为变量  $V_{dc} = V_{bias}$  V。

(4) 在原理图的元件面板列表上, 选择集总参数元件【Lumped-Components】项, 在集总参数元件面板上, 选择电容 C 和电感 L, 插入原理图中。电容 C 和电感 L 的值分别设置如下。

- $C1 = 10\text{pF}$ 。

- $L = 1000\text{nH}$ 。

(5) 在集总参数元件面板上, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 元件面板上出现与 S 参数仿真对应的元件图标。在 S 参数仿真元件面板上, 选择负载终端 Term 插入原理图中, 在原理图工具栏中单击  按钮, 让负载终端 Term 接地。

(6) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的负载终端 Term 和调谐网络连接起来, 连接方式如图 6.233 所示。

(7) 在工具栏中选择【VAR】, 插入到原理图中, 双击 VAR, 弹出【Variables and Equations】设置对话框, 在对话框中对变量设为  $V_{bias} = 5$ 。完成设置的变量控件【VAR】如图 6.234 所示。

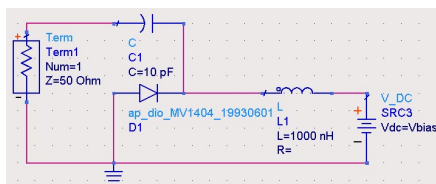


图 6.233 带有负载终端的调谐网络

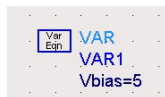


图 6.234 变量控件

(8) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择参数扫描控制器【PARAMETER SWEEP】, 插入到原理图中, 参数扫描控制器的参数设置如下。

- ① 扫描变量为  $V_{bias}$ 。

- ② 扫描的仿真为 SP1。

- ③ Start=1, 表示扫描的起始值。

- ④ Stop= 10, 表示扫描的终止值。

- ⑤ Step=0.1, 表示扫描的间隔值。

设置完成的参数扫描控制器如图 6.235 所示。

(9) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择输入阻抗测量控件 Zin 插入到原理图中, 输入阻抗测量控件 Zin 如图 6.236 所示。

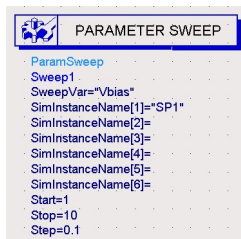


图 6.235 设置完成的参数扫描控制器

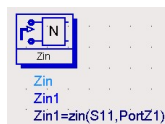



图 6.236 输入阻抗测量控件 Zin

(10) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控制器 SP, 插入原理图中, 将仿真控件参数设置如下。

频率设置为单点频率，频率值为 1.8GHz。

(11) 在原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真。当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入一个方程，步骤如下。

① 在显示面板中选择方程显示方式，插入到数据显示视窗中。

**Eqn**  $C\_Varactor = -1 / (2 * \pi * \text{freq}[0,0] * \text{imag}(Zin1[0]))$       ② 方程设置为  $C\_Varactor = -1 / (2 * \pi * \text{freq}[0,0] * \text{imag}(Zin1[0]))$ 。

图 6.237 显示电容的方程

用来显示电容的方程如图 6.237 所示。

(12) 在数据显示视窗中选择矩形图显示方式显示电容  $C\_Varactor$ ，曲线如图 6.238 所示。

(13) 在数据显示视窗中选择数据列表显示方式显示电容  $C\_Varactor$ ，数据如图 6.239 所示。

(14) 设置调谐网络时，变量  $Vbias = 3.8V$ 。

2. 振荡器的设计

(1) 将原理图 VCO-1 另存为 VCO-3。

(2) 删掉如下元器件。

- ① 删掉优化控件 Optim。
- ② 删掉两个目标控件 Goal。
- ③ 删掉电流指示表 I\_Probe。
- ④ 删掉直流仿真控制器 DC。

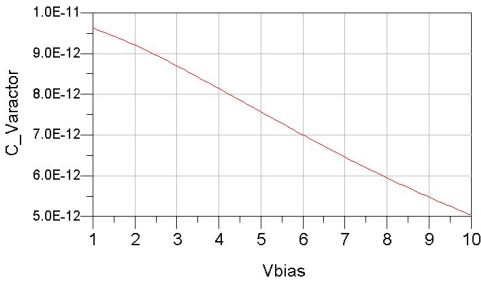


图 6.238 电容曲线

Vbias	C_Varactor
1.000	9.623E-12
1.100	9.586E-12
1.200	9.548E-12
1.300	9.509E-12
1.400	9.468E-12
1.500	9.427E-12
1.600	9.384E-12
1.700	9.340E-12
1.800	9.295E-12
1.900	9.249E-12
2.000	9.202E-12
2.100	9.155E-12
2.200	9.106E-12
2.300	9.057E-12
2.400	9.007E-12
2.500	8.956E-12
2.600	8.905E-12
2.700	8.853E-12
2.800	8.801E-12
2.900	8.748E-12
3.000	8.694E-12
3.100	8.640E-12
3.200	8.586E-12
3.300	8.531E-12
3.400	8.476E-12
3.500	8.420E-12
3.600	8.364E-12
3.700	8.308E-12
3.800	8.252E-12
3.900	8.195E-12

图 6.239 电容数据

(3) 删掉如下节点。

- ① 删掉节点 Vcb。
- ② 删掉节点 Veb。

(4) 修改原理图

- ① 在原理图中将电阻 R2 修改为  $R2=626.512\Omega$ 。
- ② 在原理图中插入电阻  $R4=50\Omega$ ，R4 插入到电阻 R2 和晶体管集电极之间。

(5) 在原理图的元件面板列表上，选择集总参数元件【Lumped-Components】项，在集总参数元件面板上，选择电感 L，3 次插入原理图中。电感 L 的值分别设置如下。



- ①  $L=1.9\text{nH}$ ，电感  $L$  插入到基极与地之间。
- ②  $L3=1000\text{nH}$ ，电感  $L3$  插入到电阻  $R2$  和直流电压源  $\text{SRC2}$  之间。
- ③  $L4=1000\text{nH}$ ，电感  $L4$  插入到电阻  $R1$  和直流电压源  $\text{SRC1}$  之间。

(6) 调谐网络采用图 6.233 所示的原理图，但要将图中的负载终端删除，调谐网络与晶体管发射极相连。

(7) 在原理图的元件面板列表上，选择集总参数元件【Lumped-Components】项，在集总参数元件面板上，选择电阻  $R$  和电容  $C$ ，插入原理图中，插入方式及设置如下。

- ① 电容  $C$  与晶体管集电极相连， $C=1000\text{pF}$ 。
- ② 电阻  $R$  与电容  $C$  并联， $R3=50\Omega$ 。
- ③ 电阻  $R3$  接地。

(8) 修改后的原理图如图 6.240 所示。

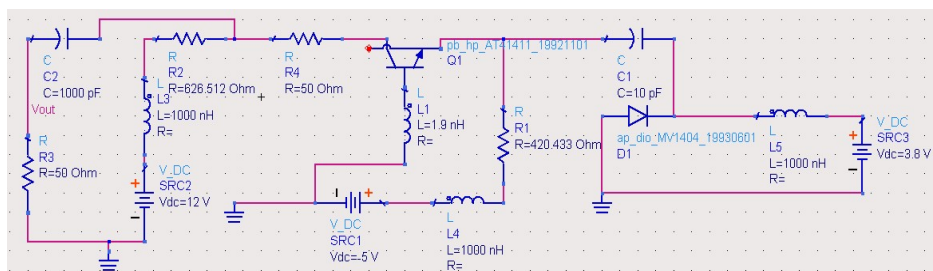


图 6.240 压控振荡器原理图

### 3. 振荡器输出信号


下面在振荡器原理图中加入瞬态仿真控制器，对振荡器原理图进行仿真，观察振荡器输出的时域和频域信号。


(1) 在原理图元器件面板上，选择瞬态仿真【Simulation-Transient】项，在瞬态仿真元器件面板上，选择瞬态仿真控制器【Trans】，插入到原理图中，双击瞬态仿真控制器【Trans】，设置如下。

- ① Stop Time = 100nsec，表示仿真的终止时间为 100 ns。
- ② Max Time Stop= 0.01nsec，表示仿真的时间间隔为 0.01 ns。

设置完成的瞬态仿真控制器 Trans 如图 6.241 所示。

(2) 在原理图中插入节点 Vout。

单击工具栏中的  按钮，在弹出的【Wire/Pin Label】对话框中输入 Vout，然后单击原理图中电阻  $R3$  与电容  $C2$  之间的连线，最后单击【Close】按钮关闭对话框，完成节点插入。

(3) 在原理图工具栏中单击  按钮，运行仿真。当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗初始状态没有任何显示，用户自己可以选择需要显示的数据和数据显示的方式。

(4) 在数据显示视窗中显示仿真的瞬态输出，步骤如下。

- ① 在显示面板中选择矩形图显示方式，插入到数据显示视窗中。
- ② 选择要显示的 Vout。在 Vout 矩形图插入 2 个标记，一个插入到 Time = 35.04 nsec 处，另一个插入到 Time = 65.53nsec 处。
- ③ Vout 的瞬态曲线如图 6.242 所示。

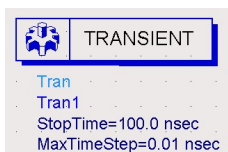


图 6.241 瞬态仿真控制器

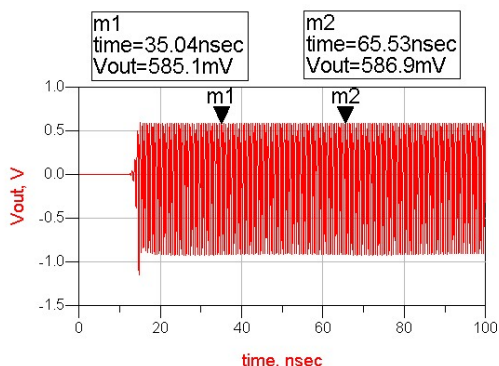


图 6.242 压控振荡器 Vout 的瞬态曲线

(5) 在数据显示视窗中插入一个方程，步骤如下。

① 在显示面板中选择方程显示方式，插入到数据显示视窗中。

② 方程设置为  $\text{Spectrum} = \text{fs}(\text{Vout}, \dots, \text{indep}(\text{m1}), \text{indep}(\text{m2}))$ 。这个方程用来查看两个标记之间的频谱，如图 6.243 所示。

(6) 在数据显示视窗中显示仿真的频谱输出，步骤如下。

① 在显示面板中选择矩形图显示方式，插入到数据显示视窗中。

② 在【Plot Traces&Attributes】窗口中选择【Equations】。

③ 在 Equations 项目下，选择【Spectrum】，在 Spectrum 矩形图中插入一个标记，标记插入到 Spectrum 幅度最大处。

频谱输出 Spectrum 的曲线如图 6.244 所示，单击工具栏【保存】按钮，保存数据。

**Eqn**  $\text{Spectrum} = \text{fs}(\text{Vout}, \dots, \text{indep}(\text{m1}), \text{indep}(\text{m2}))$

图 6.243 用来显示输出信号频谱的方程

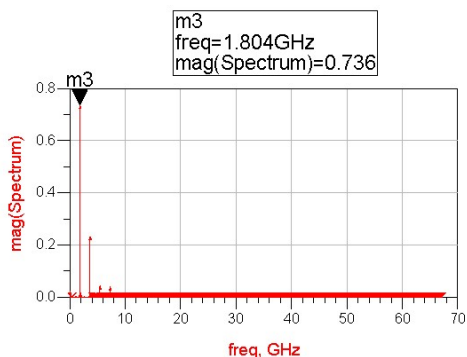


图 6.244 压控振荡器的频谱输出曲线

(7) 由图 6.242 和图 6.244 可以看出，振荡器已经很稳定地振荡起来了，由图 6.242 可以看出，振荡器的振荡幅度为 585mV，由图 6.244 可以看出振荡器的振荡频率为 1.804GHz。

#### 4. 振荡器的相位噪声

对振荡器进行谐波平衡仿真，可以分析振荡器的相位噪声，仿真振荡器的相位噪声的步骤如下。

(1) 将原理图 VCO-3 另存为 VCO-4。

(2) 删除原理图 VCO-4 中的瞬态仿真控制器。



(3) 在谐波平衡仿真【Simulation-HB】元器件面板上, 插入谐波平衡仿真控制器, 对谐波平衡仿真控制器设置如下。

- ① Freq[1]=1.8GHz, 表示谐波平衡仿真的基准频率为 1.8GHz。
- ② Order[1]=9, 表示谐波平衡仿真时基波频率的最大谐波次数为 9。
- ③ Oversample[1]= 4, 表示采样率为基波频率的 4 倍。
- ④ NLNoiseStart = 1.0Hz, 表示非线性噪声的起始频率为 1.0Hz。
- ⑤ NLNoiseStop = 10MHz, 表示非线性噪声的终止频率为 10MHz。
- ⑥ NLNoiseStep= 100kHz, 表示非线性噪声的频率间隔为 100kHz。
- ⑦ Noise Node[1] = “Vout”, 表示噪声节点为 “Vout”。
- ⑧ OscMode = yes, 表示打开振荡器分析模式。
- ⑨ OscPortName = “Yes”, 表示振荡器的端口名称由振荡器端口元器件指定。

设置完成的谐波平衡仿真控制器如图 6.245 所示。

(4) 在谐波平衡仿真【Simulation-HB】元器件面板上, 选择【OscPort】元器件插入到原理图中, 插入方式如下。

- ① 【OscPort】元器件插入到电阻 R1 和电容 C1 之间。
- ② 插入【OscPort】元器件是谐波平衡法仿真相位噪声的需要。
- ③ 【OscPort】元器件在谐振网络与终端网络之间。

(5) 在原理图的元件面板列表上, 选择带通滤波器【Filters-Bandpass】项, 在带通滤波器面板列表上, 选择切比雪夫滤波器【Chebyshev】插入到原理图中。在振荡器输出端添加带通滤波器 BPF1, 设置如下。

- ① BPF\_Chebyshev, 表示切比雪夫带通滤波器。
- ② Fcenter=1.8GHz, 带通滤波器的中心频率为 1.8GHz。
- ③ BWpass=1.7GHz, 带通滤波器的通带带宽为 1.7GHz。
- ④ Ripple=0.1dB, 带通滤波器通带内波纹为 0.1dB。
- ⑤ BWstop =2.1GHz, 带通滤波器的阻带带宽为 2.1GHz。
- ⑥ Astop =20dB, 通滤波器的阻带边缘衰减为 20 dB。

切比雪夫带通滤波器如图 6.246 所示

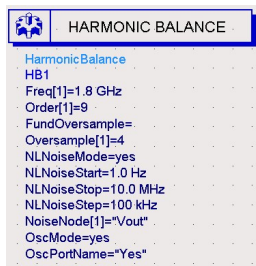



图 6.245 谐波平衡仿真控制器



图 6.246 切比雪夫带通滤波器

(6) 修改后的原理图如图 6.247 所示。

(7) 在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真。

① 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入参量为 anmx 的矩形图, 显示 anmx 的仿真结果。

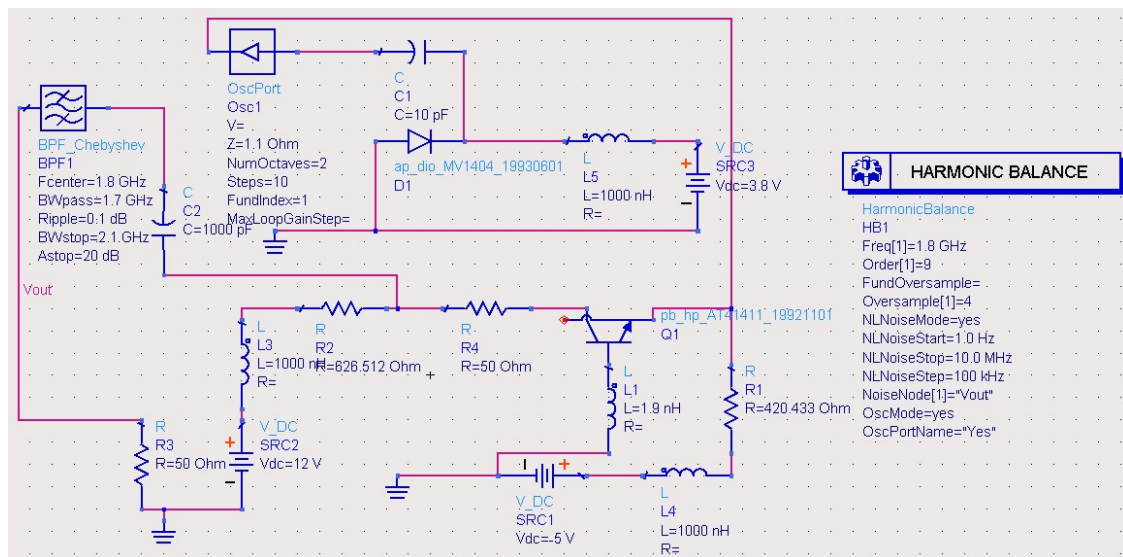
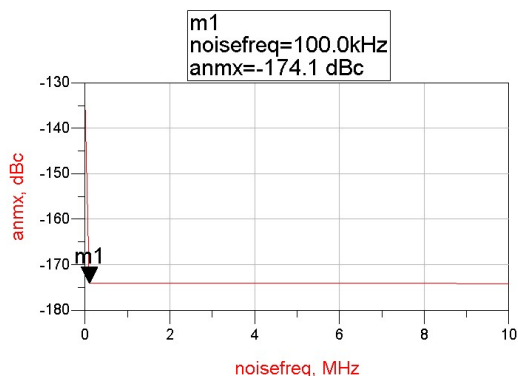
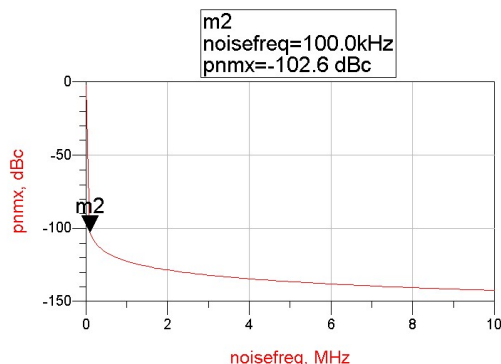


图 6.247 用于谐波平衡仿真的压控振荡器原理图

- ② 在矩形图中插入一个标记 marker，标记插入到  $\text{noisefreq}=100\text{kHz}$  处。
- ③ 在  $\text{noisefreq}=100\text{kHz}$  处  $\text{anmx}=-174.1\text{dBc}$ ，如图 6.248 所示。
- ④ 在数据显示视窗中插入参数为  $\text{pnmx}$  的矩形图，显示  $\text{pnmx}$  的仿真结果。
- ⑤ 在矩形图中插入一个标记 marker，标记插入到  $\text{noisefreq}=100\text{kHz}$  处。
- ⑥ 在  $\text{noisefreq}=100\text{kHz}$  处  $\text{pnmx}=-102.6\text{dBc}$ ，如图 6.249 所示。

在数据显示视窗中选择数据列表显示方式显示  $\text{anmx}$  和  $\text{pnmx}$  数据仿真输出，如图 6.250 所示。

图 6.248 压控振荡器  $\text{anmx}$  曲线图 6.249 压控振荡器  $\text{pnmx}$  曲线

## 5. 振荡器电压与频率

振荡器二极管的输入电压与二极管的电容有关，该二极管的电容值随外加电压值的变化而变化，使得振荡器的调谐频率可调，下面分析压控振荡器输入电压与输出频率的关系。


- (1) 将原理图 VCO-4 另存为 VCO-5。
- (2) 将原理图中的直流电压源 SRC3 设置为变量， $V_{cd} = V_{turn} V$ ，如图 6.251 所示。
- (3) 在工具栏中选择【VAR】，插入到原理图中，双击 VAR，弹出【Variables and Equations】

设置对话框, 在对话框中对变量为  $V_{turn} = 3.8V$ 。完成设置的变量控件【VAR】如图 6.252 所示。

(4) 修改谐波平衡控制器, 设置如下。

- ① 删掉噪声项。
- ② SweepVar= “Vturn”, 表示扫描变量为  $V_{turn}$ 。
- ③ Start= 1, 表示扫描的起始值。
- ④ Stop= 10, 表示扫描的终止值。
- ⑤ Step=0.1, 表示扫描的间隔值。
- ⑥ 其余选项默认不变。

设置完成的谐波平衡仿真控制器如图 6.253 所示。

(5) 在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真。

当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入关于 freq 的矩形图, 显示 freq 的仿真结果。freq 的矩形图如图 6.254 所示。

(6) 由图 6.254 可以看出, 压控振荡器的输出频率随输入电压而变。

noisefreq	anmx	pnmx
1.000 Hz	-132.5 dBc	-2.280 dBc
100.0 kHz	-174.1 dBc	-102.6 dBc
200.0 kHz	-174.1 dBc	-108.6 dBc
300.0 kHz	-174.1 dBc	-112.1 dBc
400.0 kHz	-174.1 dBc	-114.6 dBc
500.0 kHz	-174.1 dBc	-116.6 dBc
600.0 kHz	-174.1 dBc	-118.2 dBc
700.0 kHz	-174.1 dBc	-119.5 dBc
800.0 kHz	-174.1 dBc	-120.7 dBc
900.0 kHz	-174.1 dBc	-121.7 dBc
1.000 MHz	-174.1 dBc	-122.6 dBc
1.100 MHz	-174.1 dBc	-123.4 dBc
1.200 MHz	-174.1 dBc	-124.2 dBc
1.300 MHz	-174.1 dBc	-124.9 dBc
1.400 MHz	-174.1 dBc	-125.5 dBc
1.500 MHz	-174.1 dBc	-126.1 dBc
1.600 MHz	-174.1 dBc	-126.7 dBc
1.700 MHz	-174.1 dBc	-127.2 dBc
1.800 MHz	-174.1 dBc	-127.7 dBc
1.900 MHz	-174.1 dBc	-128.2 dBc
2.000 MHz	-174.1 dBc	-128.6 dBc
2.100 MHz	-174.1 dBc	-129.0 dBc
2.200 MHz	-174.1 dBc	-129.5 dBc
2.300 MHz	-174.1 dBc	-129.8 dBc
2.400 MHz	-174.1 dBc	-130.2 dBc
2.500 MHz	-174.1 dBc	-130.6 dBc
2.600 MHz	-174.1 dBc	-130.9 dBc
2.700 MHz	-174.1 dBc	-131.2 dBc
2.800 MHz	-174.1 dBc	-131.5 dBc
2.900 MHz	-174.1 dBc	-131.9 dBc

图 6.250 压控振荡器 anmx 和 pnmx 数据仿真输出

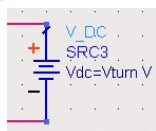


图 6.251 直流电压源 SRC3

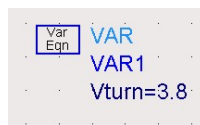


图 6.252 变量控件

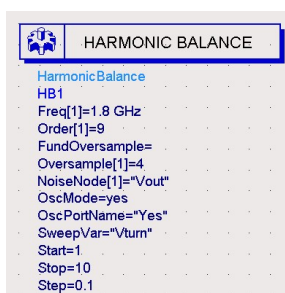


图 6.253 谐波平衡仿真控制器

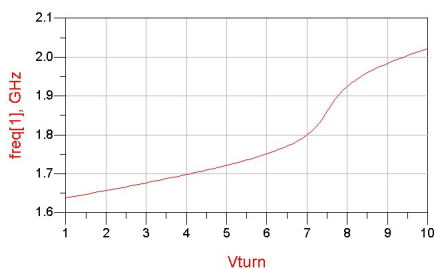


图 6.254 压控振荡器输入电压与输出频率的关系

## 习题

1. 在物联网射频电路中, 匹配电路是一个比较重要的基础概念, 查阅相关文献, 对其理论知识做进一步学习和掌握。
2. 信号通过滤波器时产生衰减可能是哪些方面的原因呢?
3. 在本章中作者引用切比雪夫滤波器的例子, 请读者利用集总参数模型, 设计巴特沃斯型低通滤波器, 并比较两种滤波器的差别。
4. ADS 提供了威尔金森功率分配器设计向导, 查阅相关资料, 设计电阻式功率分配器(参数自定)。
5. 在振荡器的仿真中, 若改变直流偏置条件, 会对结果造成何种影响?

## 第7章 ADS 通信系统综合实验

物联网作为一种非常复杂、形式多样的系统技术应用，与现代通信技术的快速发展有着密不可分的联系。

现代通信系统涵盖的范围非常广，特别在无线通信系统中，近距无线通信技术与物联网的联系更为紧密，目前使用较广泛的近距无线通信技术是蓝牙(Bluetooth)，无线局域网 802.11 (Wi-Fi) 和红外数据传输 (IrDA)。同时还有一些具有发展潜力的近距无线技术标准，它们分别是 Zigbee、超宽频 (Ultra WideBand)、短距通信 (NFC)、WiMedia、GPS、DECT、专用无线系统等。它们都有其立足的特点，或基于传输速度、距离、耗电量的特殊要求，或着眼于功能的扩充性，或符合某些单一应用的特别要求，或建立竞争技术的差异化等。

在上述的近距无线通信技术中，其中也包含基本的通信电路系统，如射频收发、射频放大等。本章将结合这些热点技术，利用 ADS 软件进行系统综合实验的仿真，有助于读者对相关热点理论知识有更深入的理解。

### 7.1 通信电路射频发射系统

射频发射系统最重要的指标是系统增益，本节将给出一个射频发射系统的原理图，这个原理图可以帮助读者了解发射系统设计的基本内容和基本方法，同时本节将对这个系统级设计的原理图进行仿真，给出系统增益预算的仿真结果。


#### 7.1.1 设计射频发射系统

##### 1. 创建原理图

下面将在射频系统的项目 RF\_System 中创建射频发射系统的原理图，创建射频发射系统原理图的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件，弹出主视窗，同时弹出【Advanced Design System】窗口，【Advanced Design System】窗口中的【Recent Workspaces】项的内容是前面曾经打开的 RF\_System\_wrk 项目。

(2) 单击【Advanced Design System】窗口中的【Recent Workspaces】项，进入 RF\_System\_wrk 项目，这时主视窗的文件浏览区为 RF\_System\_wrk 项目下的文件夹。

(3) 在主视窗的工具栏中单击按钮，弹出一个【New Schematic】对话框，其原理图默认命名为 cell\_1。

(4) 在【New Schematic】对话框中，把文件名 cell\_1 改为 Transmitter，单击【OK】按钮，将射频发射系统的原理图命名为 Transmitter。

##### 2. 搭建中频和上变频原理图电路

中频和上变频原理图包括中频放大器、本振源和混频器，用元件搭建中频和上变频原理图电路的基本步骤如下。

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择系统放大器与混频器【System-Amps & Mixers】项, 在系统放大器与混频器元件面板上, 选择放大器 Amp, 插入原理图中。

(2) 双击原理图中的放大器, 打开放大器设置对话框, 将该放大器的参数设置如下。

① Amplifier, 这是放大器。

② S21 = dbpolar (8, 180), 表示放大器的增益为 8dB。

③ S11 = polar (0, 0), 表示放大器输入端口的反射系数为 0。

④ S22 = polar (0, 180), 表示放大器输出端口的反射系数为 0。

⑤ S12 = 0, 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。

(3) 在原理图的元件面板列表上, 选择系统放大器与混频器【System-Amps & Mixers】项, 在系统放大器与混频器元件面板上, 选择混频器 Mixers, 插入原理图中。

(4) 双击原理图中的混频器 Mixers, 打开混频器 Mixers 设置对话框, 将混频器 Mixers 的参数设置如下。

① Mix, 这是混频器。

② SideBand = LOWER, 表示选择下边带。

③ ConvGain = dbpolar (-3, 0), 表示混频器的转换增益为-3dB。

④ S11 = polar (0, 0), 表示混频器端口 1 的反射系数为 0。

⑤ S22 = polar (0, 180), 表示混频器端口 2 的反射系数为 0。

⑥ S33 = 0, 表示混频器端口 3 的反射系数为 0。

(5) 在原理图的元件面板列表上, 选择集总参数元件【Lumped-Components】项, 在集总参数元件面板上, 选择电阻 R 插入原理图中。双击原理图中的电阻 R, 打开电阻 R 设置对话框, 将电阻 R 的参数设置为 50Ω。


(6) 在原理图的元件面板列表上, 选择频域源【Sources-Freq Domain】项, 在频域源元件面板上, 选择单频电压源 V\_1Tone 插入原理图中。


(7) 双击原理图中的单频电压源 V\_1Tone, 打开单频电压源的设置对话框, 将单频电压源的参数设置如下。

① V\_1Tone, 这是单频电压源。

② V = polar (1, 0) V, 表示单频电压源的电压为 1。

③ Freq = LO\_freq MHz, 表示单频电压源的频率为 LO\_freq MHz。


(8) 在原理图的工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 插入原理图中, 让单频电压源 V\_1Tone 接地。


(9) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的放大器、混频器、电阻和单频电压源 V\_1Tone 连接起来, 连接方式如图 7.1 所示。

(10) 在原理图中选择频域源【 Sources-Freq Domain】元件面板, 在电路的输入端插入单频功率源 P\_1Tone, 对单频功率源 P\_1Tone 设置如下。

① P = polar (dbmtow (IF\_freq), 0 ), 表示单频功率源输出信号的功率为 IF\_freq dBm。

② Freq = IF\_freq MHz, 表示单频功率源的频率为 IF\_freq MHz。

(11) 在原理图工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 插入原理图, 让单频功率源 P\_1Tone 接地。

单击原理图工具栏中的  按钮, 将原理图中的中频放大器和单频功率源 P\_1Tone 连接起来, 设置完成中频和上变频原理图电路, 如图 7.2 所示。



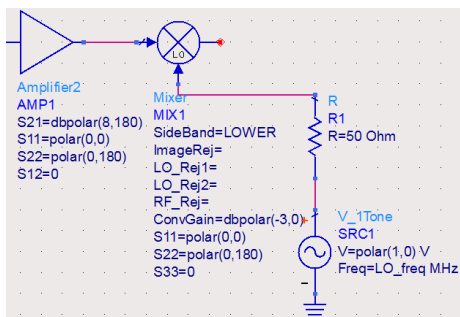


图 7.1 上变频原理图电路

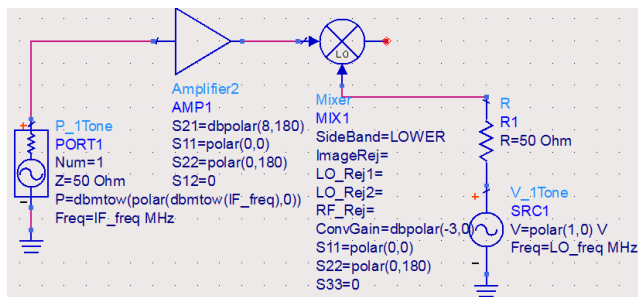


图 7.2 带有功率源的中频和上变频原理图电路

### 3. 搭建射频信号原理图电路

中频信号与本振信号混频后，产生射频信号，射频信号通过滤波和放大，可以发射。用元件搭建射频信号原理图电路的基本步骤如下。

(1) 在原理图的元件面板列表上，选择带通滤波器【Filters-Bandpass】项，在带通滤波器元件面板上，选择切比雪夫滤波器【Chbshv】，插入原理图中。

(2) 双击原理图中的切比雪夫滤波器，打开切比雪夫滤波器设置对话框，将该滤波器的参数设置如下。

- ① BPF\_Chebyshev，这是切比雪夫带通滤波器。
- ② Fcenter = 2300MHz，带通滤波器的中心频率为 2300MHz。
- ③ BWpass = 80MHz，带通滤波器的通带带宽为 80MHz。
- ④ Apass = 3dB，带通滤波器通带边缘的衰减为 3dB。
- ⑤ Ripple = 0.1dB，带通滤波器通带内波纹为 0.1dB。
- ⑥ BWstop = 400MHz，带通滤波器的阻带带宽为 400MHz。
- ⑦ Astop = 30dB，带通滤波器阻带边缘的衰减为 30dB。
- ⑧ IL = 1.2dB。带通滤波器的插入衰减为 1.2dB。

(3) 在原理图的元件面板列表上，选择系统放大器与混频器【System-Amps & Mixers】项，在系统放大器与混频器元件面板上，选择放大器【Amp】，插入原理图中。

(4) 双击原理图中的放大器，打开放大器设置对话框，将该放大器的参数设置如下。

- ① Amplifier，这是放大器。
- ② S21 = dbpolar (20, -180)，表示放大器的增益为 20dB。
- ③ S11 = polar (0, 0)，表示放大器输入端口的反射系数为 0。
- ④ S22 = polar (0, 180)，表示放大器输出端口的反射系数为 0。
- ⑤ S12 = 0，表示放大器的反向传输为 0，为单向放大器。
- ⑥ NF = 15dB。表示放大器的噪声系数为 15dB。


(5) 在原理图的元件面板列表上，选择带通滤波器【Filters-Bandpass】项，在带通滤波器元件面板上，选择切比雪夫滤波器【Chbshv】，插入原理图中。


(6) 双击原理图中的切比雪夫滤波器，打开切比雪夫滤波器设置对话框，将该滤波器的参数设置如下。

- ① BPF\_Chebyshev，这是切比雪夫带通滤波器。
- ② Fcenter = 2 300MHz，带通滤波器的中心频率为 2 300MHz。

- ③ BWpass = 80MHz, 带通滤波器的通带带宽为 80MHz。
- ④ Apass = 3dB, 带通滤波器通带边缘的衰减为 3dB。
- ⑤ Ripple = 0.1 dB, 带通滤波器通带内波纹为 0.1dB。
- ⑥ BWstop = 400MHz, 带通滤波器的阻带带宽为 400MHz。
- ⑦ Astop = 30dB, 带通滤波器阻带衰减为 30dB。
- ⑧ IL = 1.5dB。带通滤波器的插入衰减为 1.5dB。

(7) 在原理图的元件面板列表上, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 在 S 参数仿真元件面板上, 选择负载终端 Term 插入到原理图中, 定义负载终端 Term2 为输出端口。

(8) 在原理图的工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 插入到原理图中, 让负载终端 Term2 接地。

(9) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的两个滤波器、一个放大器和终端负载连接起来, 连接方式如图 7.3 所示。

#### 4. 射频发射系统原理图电路

将图 7.2 所示的中频和上变频原理图电路与图 7.3 所示的射频信号电路原理图连接在一起, 就构成了射频发射系统原理图电路, 射频发射系统原理图电路如图 7.4 所示。

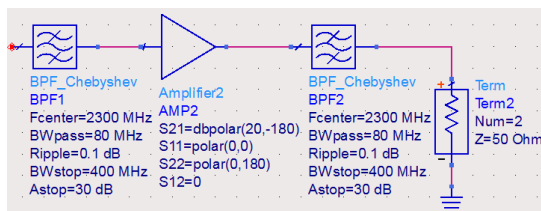


图 7.3 射频信号电路原理图

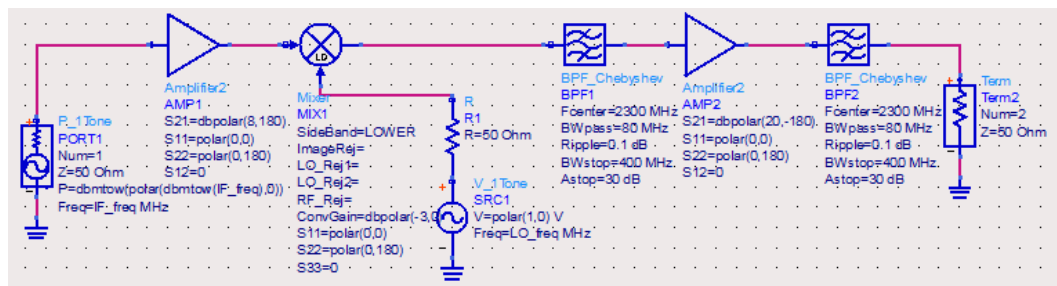


图 7.4 射频发射系统原理图电路

### 7.1.2 射频发射系统仿真与实现

射频发射系统最重要的参数指标为系统增益, 射频发射系统增益预算仿真用于给出系统增益在系统各个部分中的分配情况, ADS 软件中的交流仿真具有增益预算仿真功能。下面进行射频发射系统增益预算仿真, 仿真的基本步骤如下。

(1) 在原理图的工具栏, 选择变量【VAR】按钮, 插入原理图的画图区。

(2) 在画图区中双击【VAR】, 弹出【Variables and Equations】设置对话框, 将中频频率、本振频率和中频功率设置为变量。

① 设置中频频率。在端口 1 将单频功率源的频率设置为变量, 在【VAR】控件中设置中频频率 IF\_freq = 30。

② 设置本振频率。将本振电压源的频率设置为变量, 在【VAR】控件中设置本振频率 LO\_freq = 2330。

③ 设置中频功率。在端口 1 将单频功率源的功率设置为变量, 在【VAR】控件中设置中频功率 IF\_pwr = 5。

完成设置【Variables and Equations】窗口的参量后, 原理图中的变量控件【VAR】如图 7.5 所示。

(3) 在原理图的元件面板列表上, 选择交流仿真【Simulation-AC】项。在交流仿真元件面板上, 选择交流仿真控制器插入原理图中。双击原理图中的交流仿真控制器, 打开【AC Small Signal Simulation】对话框, 对话框中有【Frequency】、【Parameters】和【Display】等项, 在对话框中可以对这些项进行参数设置。

(4) 设置交流仿真控制器中的【Frequency】项。

① 在频率扫描类型中, 选择 Single point, 意为频率单点扫描。

② 在频率设置中, 将频率设置为 30MHz。

(5) 设置交流仿真控制器中的【Parameters】项。

① 选择【Enable AC frequency coversion】项。

② 选择【Perform Budget Simulation】项。

(6) 设置交流仿真控制器中的【Display】项。

① 选中【FreqConversion】项。

② 选中【OutputBudgetIV】项。

③ 选中【Freq】项。

(7) 用于发射系统增益预算的交流仿真控制器如图 7.6 所示。

(8) 预算分析还需要设置预算路径和建立预算方程。在原理图中选择【Simulation】→【Generate Budget Path】选项, 打开【Generate Budget Path】对话框, 如图 7.7 所示。

(9) 在【Generate Budget Path】对话框中, 选择如下。

① 输入端口【Input Pin】选择【PORT1】, 表示端口 1 为预算的起始点。

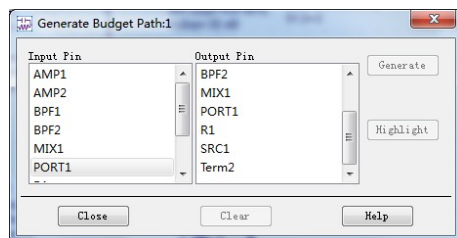
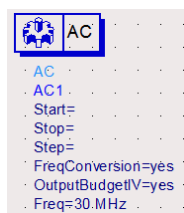
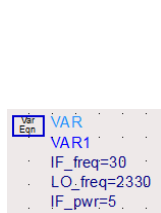


图 7.5 发射系统变量控件 图 7.6 发射系统交流仿真控件

图 7.7 设置发射系统预算路径

② 输出端口【Output Pin】选择【Term2】, 表示端口 2 为预算的终止点。

③ 单击该对话框中的【Generate】按钮, 完成设置预算路径。

④ 单击该对话框中的【Highlight】按钮, 高亮预算路径。

(10) 在单击【Generate Budget Path】对话框中的【Generate】按钮时, 预算增益方程自动生成, 预算增益方程如图 7.8 所示。



(11) 在原理图的元件面板列表上, 选择交流仿真【Simulation-AC】项。在交流仿真元件面板上, 选择功率增益预算控件【BudGain】插入原理图中, 设置其中的方程如下。

$\text{BudGain1}=\text{bud\_gain}(\text{,, } 50.0,\text{,, budget\_path})$ 。

完成设置的功率增益预算控件如图 7.9 所示。

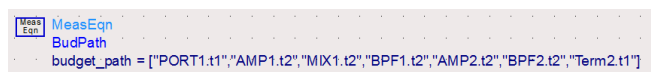


图 7.8 增益预算方程

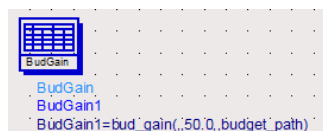


图 7.9 增益预算控件

(12) 用于仿真的发射系统原理图如图 7.10 所示。

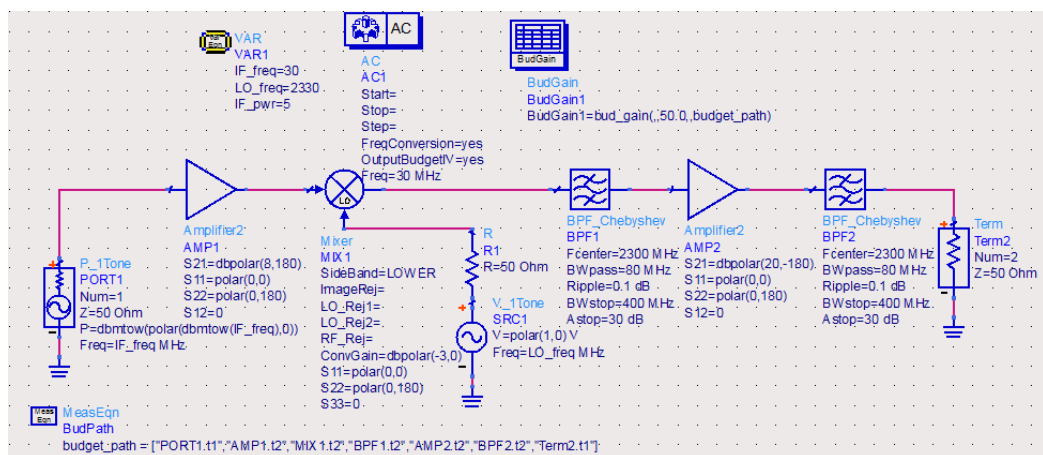


图 7.10 用于仿真的发射系统原理图

(13) 在如图 7.10 所示的原理图工具栏中单击 按钮运行仿真, 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入 BudGain1 曲线的矩形图, 但图中并没有任何曲线生成。做如下修改。

将 BudGain1 矩形框的 Y 轴由 BudGain1 更改为 BudGain1[0]。

现在数据显示视窗中出现功率增益预算曲线, 如图 7.11 所示。

(14) 由图 7.11 可以得到如下数据。

① 在中频放大器 ANTI 处, 系统增益为 8dB, 这是中频放大器的增益值。

② 在混频器 N1TX1 处, 系统增益为 5dB, 这是因为混频器有-3MB 增益。

③ 在射频滤波器 BPF1 处, 系统增益为 3.8dB, 这是因为射频滤波器 1 有 1.2dB 的插入衰减。

④ 在射频放大器 ANIP2 处, 系统增益为 23.8dB, 这是因为射频放大器 ANIP2 有 20dB 增益。

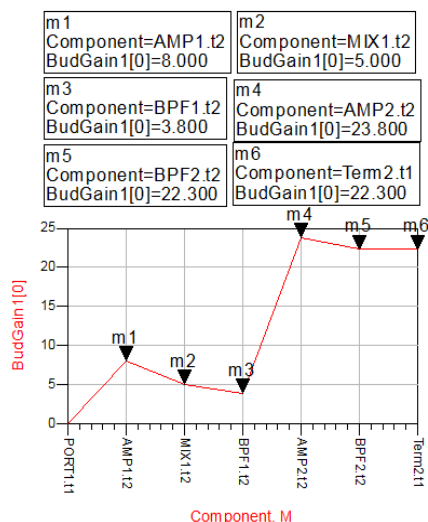


图 7.11 功率增益预算曲线

- ⑤ 在射频滤波器 BPF2 处, 系统增益为 22.3dB, 这是因为射频滤波器 2 有 1.5dB 的插入衰减。
- ⑥ 在负载终端 2, 系统增益为 22.3dB。

## 7.2 通信电路射频接收系统

射频接收系统的设计与仿真使用行为级功能模块实现, 行为级功能模块包括滤波器、放大器和混频器等, 这些行为级功能模块在 ADS 软件中由系统级元件构成, 可以运用 S 参数仿真、交流仿真和谐波平衡仿真等对一个射频接收系统进行多种仿真, 从而确定该射频接收系统的各种性能指标。

### 7.2.1 设计射频接收系统

#### 1. 创建项目

下面将创建一个射频系统的项目, 本章所有的设计都将保存在这个项目之中。创建射频系统项目的步骤如下。

(1) 启动 ADS 软件, 弹出主视窗。

(2) 选择主视窗中【File】→【New Workspace】命令, 在弹出如图 7.12 所示的【New Workspace Wizard】对话框中, 输入项目的名称, 这里项目名称定为 RF\_System。

(3) 单击【Finish】按钮完成系统项目的创建。

#### 2. 创建原理图

在 RF\_System 项目中, 创建一个射频接收系统的原理图, 这个原理图命名为 Receiver1。创建原理图的方法很多, 这里创建原理图的步骤如下。

在主视窗中选择【File】→【New Schematic】命令, 弹出【New Schematic】对话框, 在【New Schematic】对话框中, 输入新建的原理图名称 Receiver0, 单击【OK】按钮, 完成原理图创建, 新建的原理图 Receiver0 自动打开。

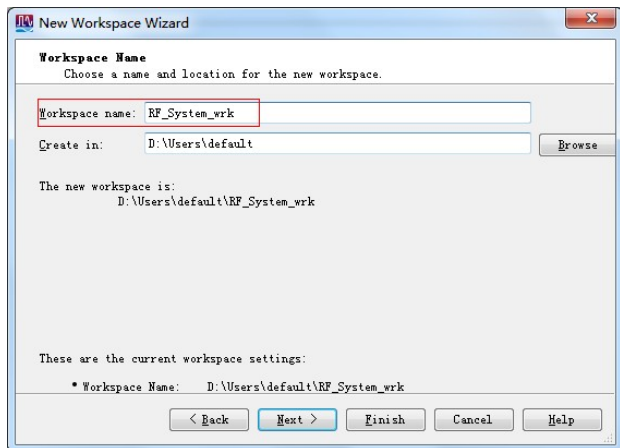


图 7.12 创建射频系统的项目

### 3. 接收机构成说明

这里设计的射频接收机由如下元件构成,按顺序对这些元件的说明如下。

(1) 频域功率源。这个频域功率源用来代替接收到的射频信号。

(2) 射频带通滤波器。接收到的射频信号首先通过这个带通滤波器,带通滤波器的中心频率选为 2.4GHz,插入损耗选为 1dB。

(3) 低噪声放大器。射频信号通过这个放大器进行低噪声放大,放大器的噪声系数选为 2dB,增益选为 21dB。

(4) 功率分配器 1。这是等功率分配器,其将射频信号平分为同相和正交两路,平分后的两路射频信号将进入混频器。

(5) 混频器。这个混频器是下变频器,其作用是将射频信号和本振信号进行混频。

(6) 本振源。本振源即可以由功率源构成,又可以由电压源加电阻构成,本振源产生本振频率,本振频率选为 2.3 GHz。

(7) 功率分配器 2。这是等功率分配器,其将本振信号平分为同相和正交两路,平分后的两路本振信号也将进入混频器。

(8) 相移器。平分后的两路本振信号有一路需要移相  $90^\circ$ 。

(9) 中频带通滤波器。混频后得到的中频信号需要滤波,中频滤波器是带通滤波器,带通滤波器的中心频率选为 70MHz。两路中频输出都需要中频带通滤波器。

(10) 中频放大器。中频放大器的增益是一个变量,可以在某一范围内选取增益的数值。两路中频输出都需要中频放大器。

(11) 负载终端。负载终端为 5052,两路中频输出都需要负载终端。

### 4. 搭建射频前端原理图电路

射频前端电路的原理图包括射频带通滤波器和射频放大器,用元件搭建射频前端原理图,电路的基本步骤如下。

(1) 在原理图的元件面板列表上,选择带通滤波器【Filters-Bandpass】项,在带通滤波器元件面板上,选择切比雪夫滤波器【Chebyshev】,插入原理图中。

(2) 双击原理图中的切比雪夫滤波器,打开切比雪夫滤波器设置对话框,将该滤波器的参数设置如下。

- ① BPFes\_Chebyshev, 这是切比雪夫带通滤波器。
- ② Fcenter = 2 400MHz, 带通滤波器的中心频率为 2 400MHz。
- ③ BWpass = 80MHz, 带通滤波器的通带带宽为 80MHz。
- ④ Apass = 3dB, 带通滤波器通带边缘的衰减为 3dB。
- ⑤ Ripple = 0.1 dB, 带通滤波器通带内波纹为 0.1dB。
- ⑥ BWstop = 0.4GHz, 带通滤波器的阻带带宽为 400MHz。
- ⑦ Astop = 25dB, 带通滤波器阻带边缘的衰减为 25dB。
- ⑧ IL = 1dB。带通滤波器的插入衰减为 1dB。

(3) 在原理图的元件面板列表上,选择系统放大器与混频器【System-Amps & Mixers】项,在系统放大器与混频器元件面板上,选择放大器【Amp】,插入原理图中。

(4) 双击原理图中的放大器,打开放大器设置对话框,将该放大器的参数设置如下。

- ① Amplifier, 这是放大器。


②  $S21 = \text{dbpolar}(21, 180)$ , 表示放大器的增益为 21dB。

③  $S11 = \text{polar}(0, 0)$ , 表示放大器输入端口的反射系数为 0。

④  $S22 = \text{polar}(0, 180)$ , 表示放大器输出端口的反射系数为 0。

⑤  $S12 = 0$ , 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。


⑥  $NF = 2\text{dB}$ 。表示放大器的噪声系数为 2dB。对于射频系统来说, 第一级放大器的噪声系数对总噪声系数的影响最大, 因此第一级放大器的噪声系数要尽可能小。


(5) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的放大器和带通滤波器连接起来, 设置完成的射频前端原理图电路如图 7.13 所示。

(6) 在原理图中选择频域源【Sources-Freq Domain】元件面板, 在电路的输入端插入单频功率源 P1Tone, 对单频功率源 P1Tone 设置如下。

①  $P = \text{polar}(\text{dbmtow}(\text{RF\_freq}), 0)$ , 表示单频功率源输出信号的功率为变量, 变量设置为 RF\_freq dBm。

②  $\text{Freq} = \text{RF\_freq MHz}$ , 表示单频功率源的频率为变量, 变量设置为 RF\_freq MHz。

(7) 在原理图的工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 插入原理图, 让单频功率源 P1Tone 接地。

(8) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的带通滤波器和单频功率源 P1Tone 连接起来, 连接方式如图 7.14 所示。

## 5. 搭建下变频原理图电路

下变频电路的原理图包括两个功率分配器、两个混频器、一个相移器和一个本振源, 用元件搭建下变频原理图电路的基本步骤如下。

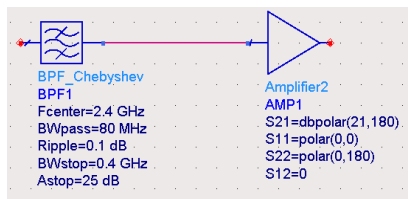


图 7.13 射频前端原理图电路

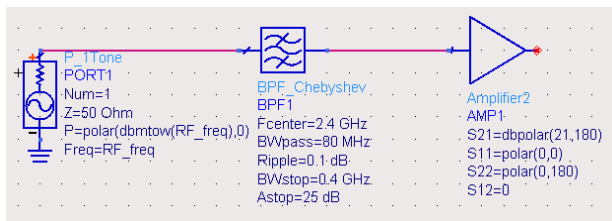


图 7.14 带有功率源的射频前端原理图电路

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择无源系统元件【System-Passive】项, 元件面板上出现与无源系统元件对应的元件图标。在无源系统元件面板上, 选择功率分配器【PwrSplit】, 插入原理图中, 保持功率分配器的默认状态。

(2) 在原理图的元件面板列表上, 选择系统放大器与混频器【System-Amps & Mixers】项, 在系统放大器与混频器元件面板上, 选择混频器【Mixers】, 插入原理图中。

(3) 双击原理图中的混频器【Mixers】, 打开混频器【Mixers】设置对话框, 将混频器【Mixers】的参数设置如下。

① Mix1, 这是混频器 1。

② SideBand = LOWER, 表示选择下边带。

③ ConvGain = dbpolar(10, 0), 表示混频器的转换增益为 10dB。

④  $S11 = \text{polar}(0, 0)$ , 表示混频器端口 1 的反射系数为 0。

⑤  $S22 = \text{polar}(0, 180)$ , 表示混频器端口 2 的反射系数为 0。

⑥  $S_{33} = 0$ ，表示混频器端口 3 的反射系数为 0。

⑦  $NF = 13\text{dB}$ ，表示混频器的噪声系数为 13dB。

(4) 将混频器 Mix 1 复制一次，形成与混频器 Mix 1 参数相同的混频器 Mix2。

(5) 在原理图的元件面板列表上，选择无源系统元件【System-Passive】项，元件面板上出现与无源系统元件对应的元件图标。在无源系统元件面板上，选择功率分配器【PwrSplit】，将功率分配器【PwrSplit】旋转  $180^\circ$ ，插入原理图中，保持功率分配器的默认状态。

(6) 在原理图的元件面板列表上，选择无源系统元件【System-Passive】项，元件面板上出现与无源系统元件对应的元件图标。在无源系统元件面板上，选择移相器【Phsshft】，将移相器【Phsshft】旋转  $90^\circ$ ，插入原理图中，保持移相器的默认状态。

(7) 在原理图的元件面板列表上，选择集总参数元件【Lumped-Components】项，在集总参数元件面板上，选择电阻 R，插入原理图中。双击原理图中的电阻 R，打开电阻 R 设置对话框，将电阻 R 的参数设置为  $50\Omega$ 。

(8) 在原理图的元件面板列表上，选择频域源【Sources-Freq Domain】项，在频域源元件面板上，选择单频电压源  $V\_1\text{Tone}$ ，插入原理图中。


(9) 双击原理图中的单频电压源  $V\_1\text{Tone}$ ，打开单频电压源的设置对话框，将单频电压源的参数设置如下。

①  $V\_1\text{Tone}$ ，这是单频电压源。

②  $V = \text{polar}(1, 0)$  V，表示单频电压源的电压为 1。

③  $\text{Freq} = \text{LO\_freq MHz}$ ，表示单频电压源的频率为变量，变量设置为 LO\_freq MHz。

(10) 在原理图的工具栏中单击“接地”按钮，将地线（Ground）插入原理图中，让单频电压源  $V\_1\text{Tone}$  接地。

(11) 单击工具栏中的  按钮，将原理图中的 2 个功率分配器、2 个混频器、1 个相移器和 1 个本振源连接起来，形成下变频电路，连接方式如图 7.15 所示。

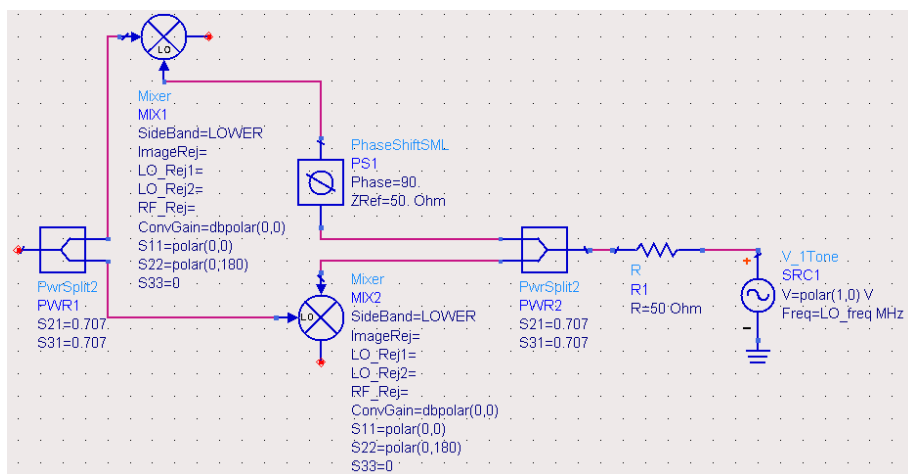


图 7.15 下变频电路原理图

## 6. 搭建中频原理图电路

中频电路的原理图包括中频带通滤波器、中频放大器和终端负载，用元件搭建中频原理图电路的基本步骤如下。

(1) 在原理图的元件面板列表上, 选择带通滤波器【Filters-Bandpass】项, 在带通滤波器元件面板上, 选择切比雪夫滤波器【Chebyshev】, 插入原理图中。

(2) 双击原理图中的切比雪夫滤波器, 打开切比雪夫滤波器设置对话框, 将该滤波器的参数设置如下。


- ① BPF- Chebyshev, 这是切比雪夫带通滤波器。
- ② Fcenter = 70MHz, 带通滤波器的中心频率为 70MHz。
- ③ BWpass = 6MHz, 带通滤波器的通带带宽为 6MHz。
- ④ Apass = 3dB, 带通滤波器通带边缘的衰减为 3dB。
- ⑤ Ripple = 0.1dB, 带通滤波器通带内波纹为 0.1dB。
- ⑥ BWstop = 40MHz, 带通滤波器的阻带带宽为 40MHz。
- ⑦ Astop = 35dB, 带通滤波器阻带边缘的衰减为 35dB。


(3) 在原理图的元件面板列表上, 选择系统放大器与混频器【System-Amps & Mixers】项, 在系统放大器与混频器的元件面板上, 选择放大器【Amp】, 插入原理图中。

(4) 双击原理图中的放大器, 打开放大器设置对话框, 将该放大器的参数设置如下。

- ① Amplifier, 这是放大器。
- ② S21 = dbpolar (G5, 180), 表示放大器的增益为变量 G5dB。
- ③ S11 = polar (0, 0), 表示放大器输入端口的反射系数为 0。
- ④ S22 = polar (0, 180), 表示放大器输出端口的反射系数为 0。
- ⑤ S12 = 0, 表示放大器的反向传输为 0, 为单向放大器。
- ⑥ NF = 15dB, 表示放大器的噪声系数为 15dB。

(5) 在原理图的元件面板列表上, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】, 在 S 参数仿真元件面板上, 选择负载终端【Term】, 插入原理图中, 定义负载终端 Term2 为输出端口。

(6) 在原理图的工具栏中单击  按钮, 将地线 (Ground) 插入原理图中, 让负载终端 Term2 接地。

(7) 单击工具栏中的  按钮, 将原理图中的带通滤波器、放大器和负载终端 Term2 连接起来, 连接方式如图 7.16 所示, 这是一路中频输出。

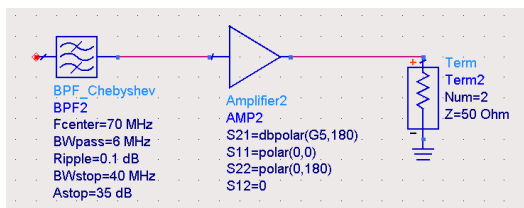


图 7.16 一路中频输出原理图电路

(8) 将如图 7.16 所示的中频电路复制一次, 形成与图 7.16 参数相同的中频电路, 形成两路相互正交的中频输出。

## 7. 超外差式接收机原理图电路

将如图 7.14 所示的射频前端原理图、如图 7.3 所示的下变频电路原理图和如图 7.16 所示的中频输出原理图连接在一起, 就构成了超外差式接收机原理图电路, 超外差式接收机的原理图电路如图 7.17 所示。



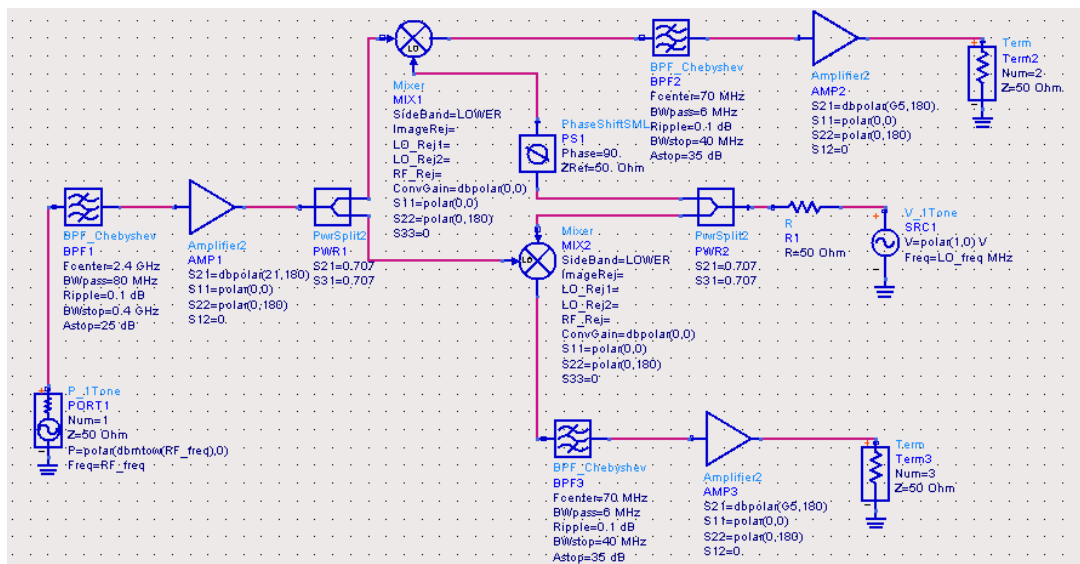


图 7.17 超外差式接收机原理图电路

## 7.2.2 射频接收系统仿真与实现

需要对超外差式接收机进行多项仿真，仿真包括接收机频带选择性仿真、接收机信道选择性仿真、接收机系统增益预算仿真和接收机输出信号频谱仿真等，这些仿真从多方面考查超外差式接收机的参数指标。

### 1. 接收机频带选择性仿真

接收机频带选择性仿真是指接收机所接收到信号的频率特性，采用 S 参数仿真，仿真的基本步骤如下。

(1) 将原理图 Receiver 0 另存为原理图 Receiver1。


(2) 在原理图 Receiver 1 中，删除如下元件。


① 删除下变频电路原理图。

② 删除两路中频电路原理图。

③ 删除射频输入端口的单频功率源 P\_I\_Tone。

(3) 在原理图的元件面板列表上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，在 S 参数仿真元件面板上，选择负载终端 Term 两次插入原理图中，定义负载终端 Term1 为输入端口，负载终端 Term2 为输出端口。

(4) 在原理图的工具栏中单击  按钮，将地线（Ground）两次插入原理图中，让两个负载终端接地。

(5) 单击工具栏中的  按钮，将原理图中的射频前端带通滤波器、射频放大器和两个负载终端连接起来。

(6) 在原理图的元件面板列表上，选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项，在 S 参数仿真元件面板上，选择 S 参数仿真控制器插入原理图中。双击原理图中的 S 参数仿真控制器，打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框，对 Frequency 项进行参数设置。


① 扫描的起始值设为 1.5GHz。



② 扫描的终止值设为 3GHz。

③ 扫描的间隔设为 0.004GHz。

(7) 用于接收机频带选择性仿真的原理图如图 7.18 所示。

(8) 对如图 7.18 所示的原理图执行 S 参数仿真。在如图 7.18 所示的原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真, 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入 S21 曲线的矩形图, 显示 S21 曲线的仿真结果, 并在 S21 曲线的矩形图中插入 3 个标记 marker, 数据显示视窗如图 7.19 所示。

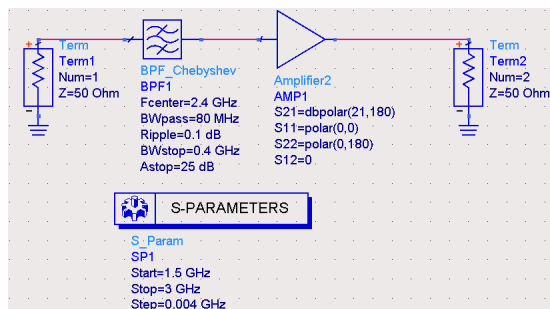


图 7.18 用于接收频带选择性仿真的原理图

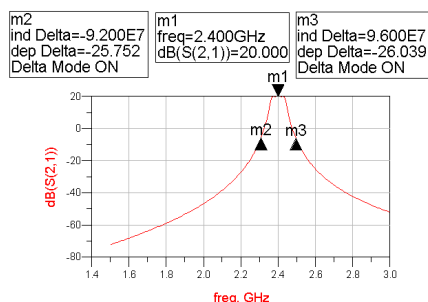


图 7.19 射频前端电路的 S21 曲线

(9) 由图 7.19 可以看到如下数据。

① 在中心频率 2.4GHz 处, 增益为 20dB。射频放大器的 21 dB 增益减去射频带通滤波器的 1 dB 插入衰减, 射频前端总计有 20 dB 的增益。

② 在标记 marker2 处, 频率与标记 marker1 处相差 92MHz, 衰减与标记 marker1 处相差 25.752dB, 符合技术指标。

③ 在标记 marker3 处, 频率与标记 marker1 处相差 96MHz, 衰减与标记 marker1 处相差 26.039dB, 符合技术指标。

(10) 在数据显示视窗中再次插入 S2 曲线的矩形图, 显示 S2 曲线的仿真结果, 并重新设置 X 轴和 Y 轴的取值范围。双击 S2 曲线的矩形框, 弹出【Plot Traces & Attribute】对话框, 选择【Plot Traces & Attribute】对话框中的【Plot Options】项, 设置 X 轴和 Y 轴的取值范围如下。

① X 轴的取值范围。Min 取为 2.2e9, Max 取为 2.6e9, Step 取为 5e7。

② Y 轴的取值范围。Min 取为 5, Max 取为 3e1, Step 取为 5。

③ X 轴和 Y 轴的取值范围的设置, 如图 7.20 所示。

(11) 在图 7.20 所示的 S21 曲线中插入两个标记 marker, 这时数据显示视窗如图 7.21 所示, 由图 7.21 可以看到如下数据。再次显示射频前端电路的 S21 曲线。

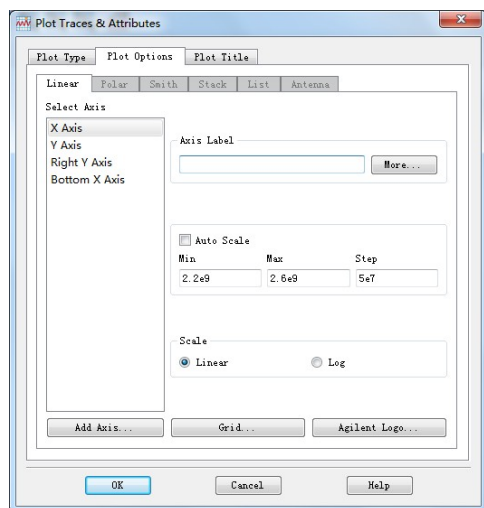
① 在 2.372GHz 处, 增益为 19.950dB, 增益波纹小于 0.1dB。

② 在 2.428GHz 处, 增益为 19.935dB, 增益波纹小于 0.1dB。

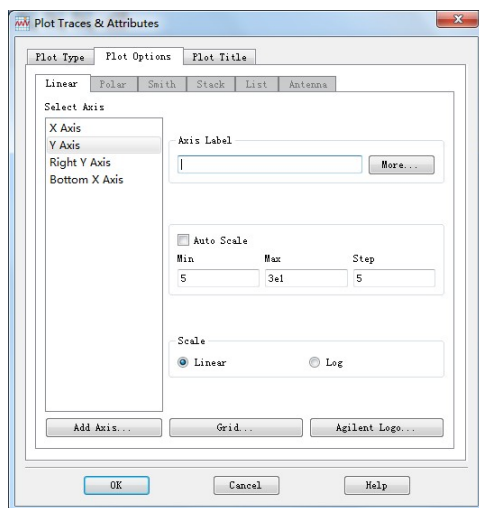
## 2. 接收机信道选择性仿真

信道选择功能主要由中频滤波器完成, 中频滤波器为带通滤波器。接下来进行信道选择性仿真, 仿真的原理图与原理图 Receiver0 相同, 仿真的基本步骤如下。

(1) 将原理图 Receiver0 另存为原理图 Receiver2。



(a) X 轴取值范围的设置



(b) Y 轴取值范围的设置

图 7.20 X 轴和 Y 轴取值范围的设置

(2) 在原理图的工具栏, 选择变量【VAR】按钮, 插入原理图的画图区。

(3) 在画图区中双击【VAR】, 弹出【Variables and Equations】设置对话框, 将射频频率、本振频率、射频接收功率和中频放大器增益设置为变量。

① 设置射频频率。在端口 1 将射频功率源的频率设置为变量 RF\_freq, 【VAR】控件中设置射频频率 RF\_freq=2400。

② 设置本振频率。将本振电压源的频率设置为变量 LO\_freq, 【VAR】控件中设置本振频率 LO\_freq = 2330。

③ 设置射频功率。在端口 1 将射频功率源的功率设置为变量 RF\_pwr, 【VAR】控件中设置射频功率 RF\_pwr = -40。

④ 设置中频放大器的增益。将中频放大器的增益设置为变量 G5, 【VAR】控件中设置中频功率增益 G5 = 32。

完成设置后, 原理图中的变量控件【VAR】如图 7.22 所示。

(4) 在原理图的元件面板列表上, 选择 S 参数仿真【Simulation-S\_Param】项, 在 S 参数仿真元件面板上, 选择 S 参数仿真控制器插入原理图中。双击原理图中的 S 参数仿真控制器, 打开【Scattering-Parameter Simulation】对话框, 对话框中有【Frequency】, 【Parameters】和【Display】等项, 在对话框中可以对这些项进行参数设置。

(5) 设置 S 参数仿真控制器中的【Frequency】项。

① 扫描的起始值设为 2.35GHz。

② 扫描的终止值设为 2.45GHz。

③ 扫描的间隔设为 0.0005GHz。

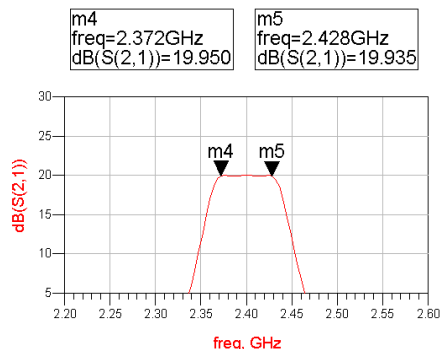


图 7.21 再次显示射频前端电路的 S21 曲线

(6) 设置 S 参数仿真控制器中的【Parameters】项。

① 选择【Enable AC frequency conversion】项。

② 其他选项保持默认状态。

(7) 设置 S 参数仿真控制器中的【Display】项。

① 选中【FreqConversion】项。

② 选中【FreqConversionPort】项。

用于接收机信道选择性仿真的 S 参数仿真控制器如图 7.23 所示。

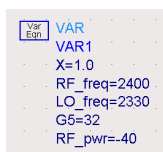


图 7.22 变量控件

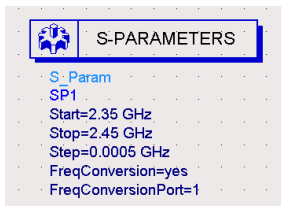



图 7.23 用于接收机信道选择性仿真的 S 参数仿真控制器

(8) 对原理图 Receiver2 执行 S 参数仿真。在原理图工具栏中单击  按钮, 运行仿真, 当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入 S21 曲线的矩形图, 显示 S21 曲线的仿真结果, 并在 S21 曲线的矩形图中插入 3 个标记 marker, 数据显示视窗如图 7.24 所示。

(9) 由图 7.24 可以看到如下数据。

① 在中心频率 2.4GHz 处, 增益为 58.989dB。

② 在标记 marker2 处, 频率与标记 marker1 处相差 9.5MHz, 衰减与标记 marker1 处相差 35.846dB, 符合技术指标。

③ 在标记 marker3 处, 频率与标记 marker1 处相差 10.5MHz, 衰减与标记 marker1 处相差 35.062dB, 符合技术指标。

(10) 在数据显示视窗中再次插入 S21 曲线的矩形图, 显示 S21 曲线的仿真结果, 并重新设置 X 轴和 Y 轴的取值范围。双击 S21 曲线的矩形框, 弹出【Plot Traces & Attribute】对话框, 选择【Plot Traces & Attribute】对话框中的【Plot Options】项, 设置 X 轴和 Y 轴的取值范围如下。

① X 轴的取值范围。Min 取为 2.36e9, Max 取为 2.44e9, Step 取为 2e7。

② Y 轴的取值范围。Min 取为 0, Max 取为 7e1, Step 取为 1e1。

(11) 在 S21 曲线中插入两个标记 marker, 这时数据显示视窗如图 7.25 所示, 由图 7.25 可以看到如下数据。

① 在 2.397GHz 处, 增益为 55.982dB, 与中心频率相比有 3MB 衰减。

② 在 2.403GHz 处, 增益为 55.978dB, 与中心频率相比有 3MB 衰减。

$2.403\text{GHz} - 2.397\text{GHz} = 0.006\text{GHz}$ , 2.397GHz 处和 2.403GHz 处为 3MB 衰减的频率。

### 3. 接收机系统增益预算仿真

接收机系统增益预算仿真用于给出系统增益在系统各个部分中的分配情况, ADS 软件的交流仿真具有增益预算仿真功能。下面进行接收机系统增益预算仿真, 仿真的原理图与原理图 Receiver0 基本相同, 只是需要更改仿真控件。仿真的基本步骤如下。

(1) 将原理图 Receiver2 另存为原理图 Receiver3。

(2) 删除原理图中的 S 参数仿真控制器。

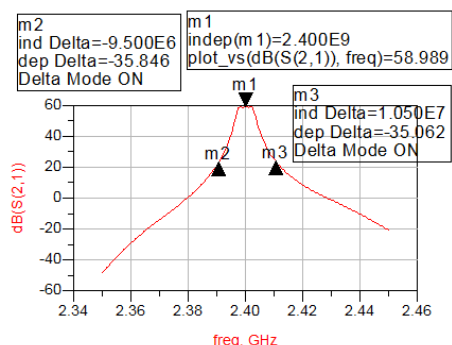


图 7.24 接收机信道选择性仿真的 S21 曲线

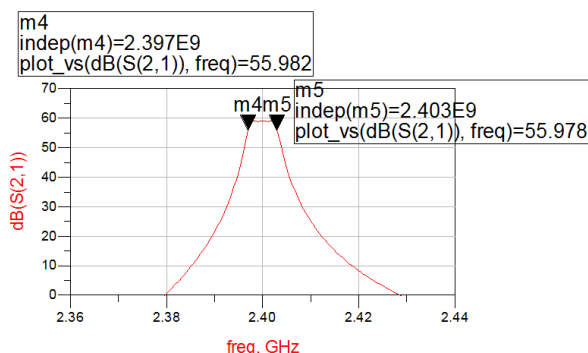


图 7.25 再次显示接收机信道选择性的 S21 曲线

(3) 在原理图的元件面板列表上, 选择交流仿真【Simulation-AC】项。在交流仿真元件面板上, 选择交流仿真控制器插入原理图中。双击原理图中的交流仿真控制器, 打开【AC Small Signal Simulation】对话框, 对话框中有【Frequency】、【Parameters】和【Display】等项, 在对话框中可以对这些项进行参数设置。

(4) 设置交流仿真控制器中的【Frequency】项。

① 在频率扫描类型中, 选择【Single point】, 表示频率单点扫描。

② 在频率设置中, 将频率设置为 2.4GHz。

交流仿真控制器中的【Frequency】项如图 7.26 所示。

(5) 设置交流仿真控制器中的【Parameters】项。

① 选择【Enable AC frequency conversion】项。

② 选择【Perform Budget simulation】项。

交流仿真控制器中的【Parameters】项如图 7.27 所示。

(6) 设置交流仿真控制器中的【Display】项。

① 选中【FreqConversion】项。

② 选中【OutputBudgetIV】项。

③ 选中【Freq】项。

交流仿真控制器中的【Display】项如图 7.28 所示。

(7) 用于接收机系统增益预算的交流仿真控制器如图 7.29 所示。

(8) 预算分析还需要设置预算路径和建立预算方程。在原理图中选择【Simulation】→【Generate Budget Path】命令, 打开【Generate Budget Path】对话框, 如图 7.30 所示。

(9) 在【Generate Budget Path】对话框中, 选择如下。

① 输入端口【Input Pin】选择【PORT 1】, 表示端口 1 为预算的起始点。

② 输出端口【Output Pin】选择【Term2】, 表示负载终端 2 为预算的终止点。两路中频输出有相同的增益, 预算仿真哪一路都可以, 这里将负载终端 2 设置为预算的终止点。

③ 单击该对话框中的【Generate】按钮, 完成设置预算路径。

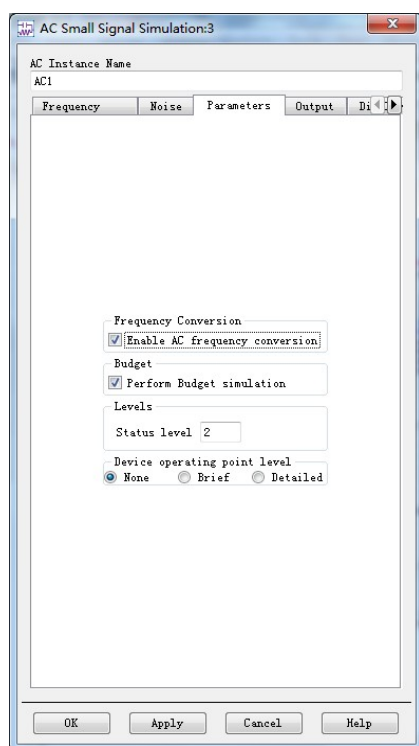


图 7.26 交流仿真控制器中的【Frequency】项

- ④ 单击该对话框中的【Highlight】按钮，高亮预算路径。  
预算路径高亮的原理图如图 7.31 所示。

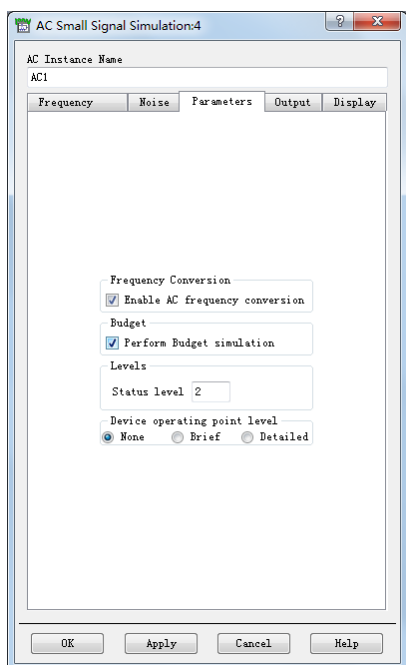


图 7.27 交流仿真控制器中的【Parameters】项

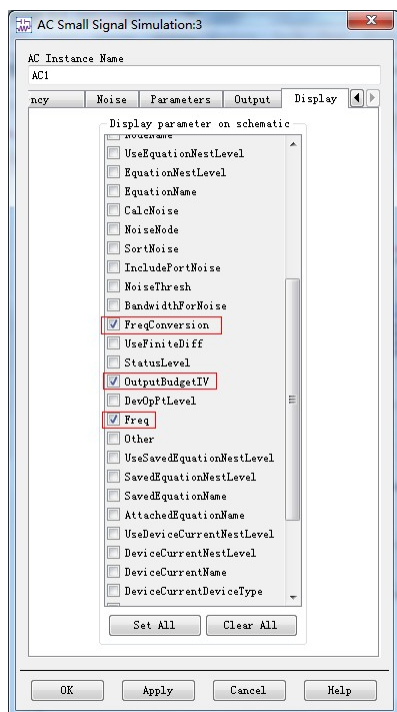


图 7.28 交流仿真控制器中的【Display】项



图 7.29 交流仿真控制器

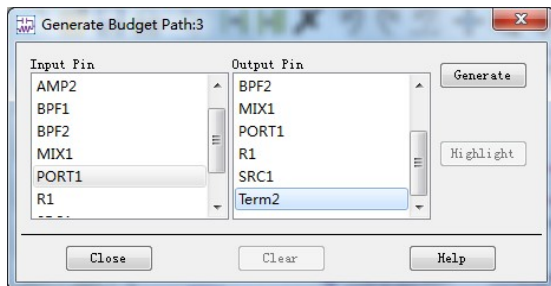



图 7.30 设置预算路径的对话框

(10) 在单击【Generate Budget Path】对话框中的【Generate】按钮时，预算增益方程自动生成，预算增益方程如图 7.32 所示。

(11) 在原理图的元件面板列表上，选择交流仿真【Simulation-AC】项。在交流仿真元件面板上，选择功率增益预算控件【BdGain】插入原理图中，设置其中的方程如下。

$\text{BudGain 1} = \text{bud\_gain} (, , 50.0, \text{budget\_path} )$

完成设置的功率增益预算控件如图 7.33 所示。

(12) 现在可以对原理图 Receiver3 执行功率增益预算仿真。在原理图工具栏中单击按钮，运行仿真，当仿真结束后，数据显示视窗会自动弹出，在数据显示视窗中插入 BudGain1 曲线的矩形图，但图中并没有任何曲线生成。作如下修改。

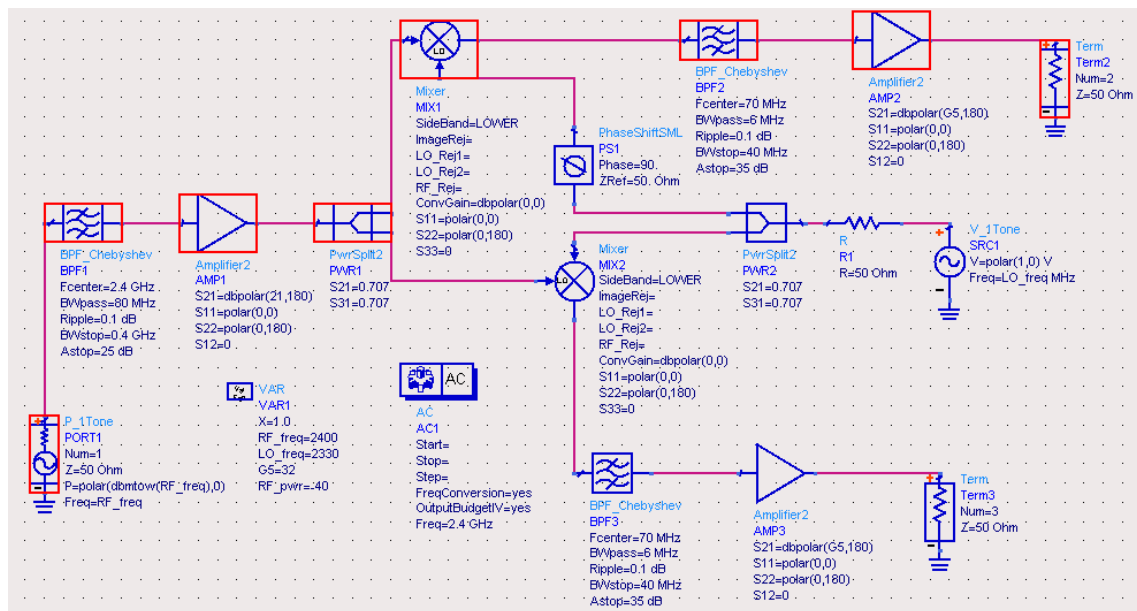


图 7.31 增益预算路径高亮

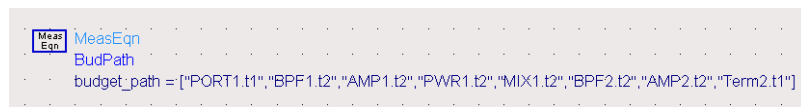


图 7.32 增益预算方程

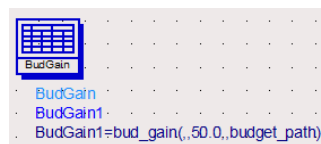


图 7.33 增益预算控件

将 BudGain1 矩形框的 Y 轴由 BudGain 1 更改为 BudGain1[0]。

这样修改的原因是预算增益仿真必须明确指定频率，这里唯一的频率为 2.4GHz，这也是频率数组中的第一个，故必须将 BudGain 1 更改为 BudGain1[0]。现在数据显示视窗中出现功率增益预算曲线，如图 7.34 所示。

(13) 由图 7.34 可以看到如下数据。

① 在射频带通滤波器 BPF1 处，系统增益为 -1 dB，这时因为射频带通滤波器有 1 dB 的插入衰减。

② 在射频放大器 AND 1 处，系统增益为 20dB，这时因为射频放大器的 21 dB 增益减去射频带通滤波器的 1 dB 插入衰减，射频前端总计有 20 dB 的增益。

③ 在功率分配器 PWR1 处，系统增益为 16.989dB，这时因为功率分配器 PWR1 有 3 dB 衰减。

④ 在混频器 MIX1 处，系统增益为 26.989dB，这是因为混频器有 10 dB 增益。

⑤ 在中频滤波器 BPF2 处，系统增益为 26.989dB。

⑥ 在中频放大器 AMP2 处，系统增益为 58.989dB，这是因为中频放大器 AMP2 有 32dB 增益。

⑦ 在负载终端 2，系统增益为 58.989dB。

(14) 修改原理图，将变量控件中的变量修改如下。

① G5 = 60，中频放大器的增益修改为 60dB。



② RF\_pwr = -68, 射频功率源的功率修改为-68dBm。

原理图修改后再次仿真, 在数据显示视窗中再次插入 BudGain1 曲线的矩形图, 显示 BudGain1 曲线的仿真结果, 如图 7.35 所示。

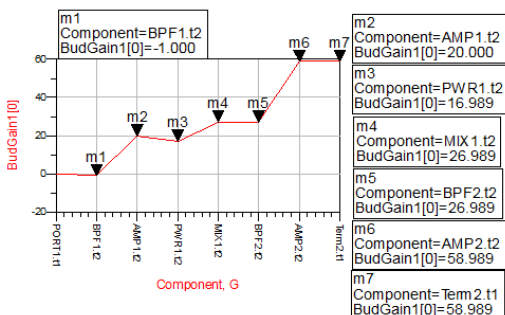


图 7.34 功率增益预算曲线

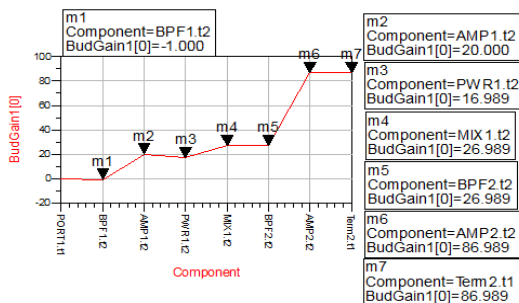


图 7.35 修改中频放大器增益后的功率增益预算曲线

比较图 7.34 和图 7.35 可以看出, 接收机在接收不同信号功率时, 系统有着不同的增益预算分配状态。

#### 4. 接收机输出信号频谱仿真

接收机输出的信号是射频频率与本振频率的差值以及它们的各次谐波和互调, 各次谐波和互调通过中频滤波器时已经被衰减, 通过接收机的频域响应可以查看上述频率转换。在 ADS 软件中, 谐波平衡仿真主要用于频域分析, 采用谐波平衡仿真可以得到接收机的频域响应。

在对原理图进行谐波平衡仿真之前, 需要对原理图进行修改。下面将修改原理图, 并对修改后的原理图进行谐波平衡仿真。

(1) 将原理图 Receiver2 另存为原理图 Receiver5。


(2) 在原理图 Receivers 上删除一些元件, 删除的元件如下。

- ① 50Ω 电阻。
- ② V\_1Tone 单频电压源。
- ③ 原理图中的 S 参数仿真控制器。

(3) 在原理图中选择频域源[Sources-Freq Domain]元件面板, 在电路的本振输入端插入单频功率源 P\_1Tone, 对单频功率源 P\_1Tone 设置如下。

- ① P = polar (dbmtow (-20), 0), 表示单频功率源输出信号的功率为-20dBm。
- ② Freq = LO\_freq MHz, 表示单频功率源的频率为 LO\_freq MHz。

本振输入端插入的单频功率源如图 7.36 所示。

(4) 单击原理图工具栏中的  按钮, 打开【Wire/Pin Label】对话框, 如图 7.37 所示。在【Wire/Pin Label】对话框中输入 Vin, 然后单击原理图中端口 1 与射频带通滤波器之间的连线, 在原理图的输入端插入节点 Vin。

(5) 在原理图的两个中频输出端, 分别插入节点 Vout\_i 和 Vout\_q。

(6) 在原理图中, 插入谐波平衡仿真控制器, 对谐波平衡仿真控制器设置如下。

- ① Freq[1] = LO\_freq MHz, 表示谐波平衡仿真的第一个基准频率为 LO\_freq MHz。
- ② Freq[2] = RF\_freq MHz, 表示谐波平衡仿真的第二个基准频率为 RF\_freq MHz。
- ③ Order[1]=3, 表示谐波平衡仿真时第一个基波频率的最大谐波次数为 3。



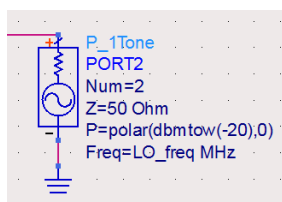


图 7.36 本振输入端插入的单频功率源

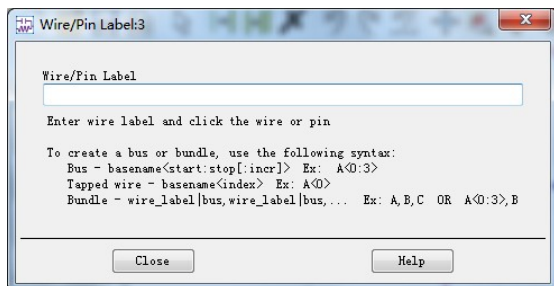



图 7.37 【Wire/PinLabel】对话框

④ Order[2]=3, 表示谐波平衡仿真时第二个基波频率的最大谐波次数为 3。

⑤ MaxOrder=4, 表示谐波平衡仿真时最大混合阶数为 4。

谐波平衡仿真控制器如图 7.38 所示。

(7) 在原理图的工具栏中单击  按钮, 运行仿真。当仿真结束后, 数据显示视窗会自动弹出, 在数据显示视窗中插入 Vin 的矩形图, 显示输入端口 Vin 的仿真结果, 并在 2.4GHz 处插入一个标记 marker 来显示中心频率 2.4GHz 处的功率。Vin 的仿真结果如图 7.39 所示。

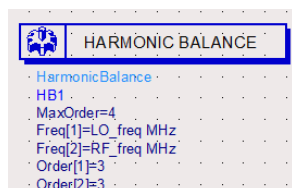


图 7.38 谐波平衡仿真控制器

(8) 由图 7.39 可以看出, 输入端口在 2.4GHz 时, 信号为 -39.999dBm, 这与输入端口的单频功率源输入功率一致。

(9) 在数据显示视窗中插入 Vout\_i 的矩形图, 显示中频输出端口 Vout\_i 的仿真结果, 并在 70MHz 处插入一个标记 marker 来显示 70MHz 处的功率, Vout\_i 的仿真结果如图 7.40 所示。

(10) 由图 7.40 可以看出, 中频输出端口在 70MHz 时, 信号为 18.989dBm, 这是由于接收机有 58.989 的增益。

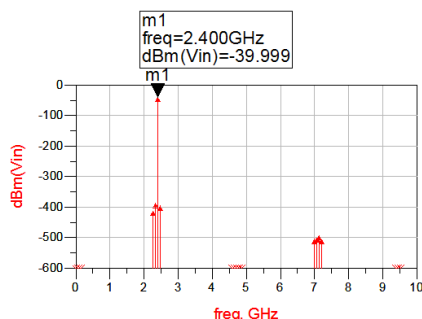


图 7.39 输入信号的功率谱

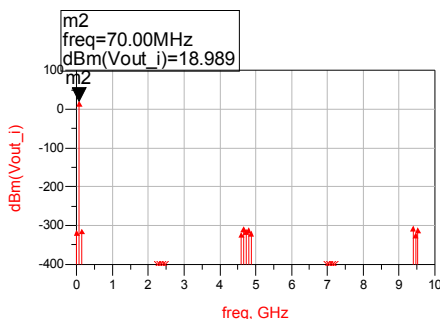


图 7.40 中频输出的功率谱

## 7.3 通信电路中射频宽带放大器设计与仿真

射频宽带放大器位于射频接收系统的前端, 其主要功能是将来自天线的小信号进行放大, 它的增益将决定对后级电路的噪声抑制程度, 因此射频宽带放大器在微波通信、GPS 接收机、遥感遥控、雷达、电子对抗、射电天文、大地测绘、电视及各种高精度的微波测量系统中, 是必不可少的重要电路。

本节着重介绍如何使用 ADS 软件进行射频宽带放大器的设计与仿真，其中包含了各种基础仿真的运用，使读者对 ADS 的设计与仿真有更深入的了解。

### 7.3.1 设计指标

本设计选用 Avago 公司的高电子迁移率晶体管（PHEMT）ATF54143 芯片进行射频宽带放大器的设计。

射频宽带放大器的设计指标选取如下。

- (1) 射频宽带放大器的工作频率选为 2.4~2.5 GHz。
- (2) 增益大于 13dB。
- (3) 通带内为绝对稳定。
- (4) 系统特性阻抗选为 50Ω。
- (5) 微带线基板的厚度选为 0.8mm，基板的相对介电常数选为 4.4。

射频宽带放大器的设计步骤如下。

- (1) 下载并安装晶体管的仿真库文件。
- (2) 直流分析。
- (3) 偏置电路分析。
- (4) 稳定性分析。
- (5) 输入匹配设计。
- (6) 最大增益的输出匹配设计。
- (7) 匹配网络的实现和原理图仿真。

### 7.3.2 射频宽带放大器的设计与仿真

#### 1. 下载并安装晶体管的仿真库文件

由于 ADS 2012 自带元器件库里没有 ATF54143 元器件模型，读者可以去 Avago 公司的网站（<http://www.avagotech.cn/pages/products/adsmodeling/>）上下载模型包 ATF-54143(ZAP)。

(1) 启动 ADS 2012 软件弹出主视窗。选择主视窗中【File】→【Unarchive】命令，如图 7.41 所示。

(2) 弹出选择文件的对话框，如图 7.42 所示。选择“ATF-54143(ZAP)”文件，单击【打开】按钮。

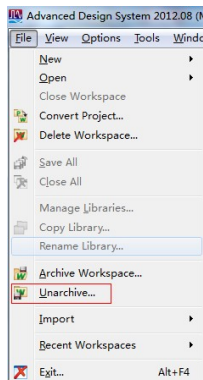


图 7.41 释放 ATF-54143(ZAP)命令

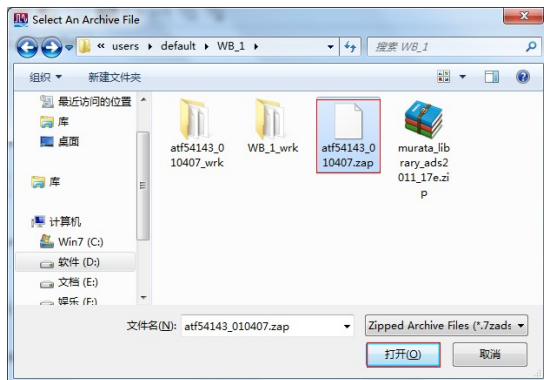


图 7.42 释放 ATF-54143(ZAP)对话框

(3) 接着弹出新建工作空间【Workspace】对话框,如图 7.43 所示。按步骤依次单击【Next】按钮,在这个过程中,加入的是各种类型的工程文件以及相应的元器件库,最后单击【Finish】完成工作空间“atf54143\_wrk”的创建。

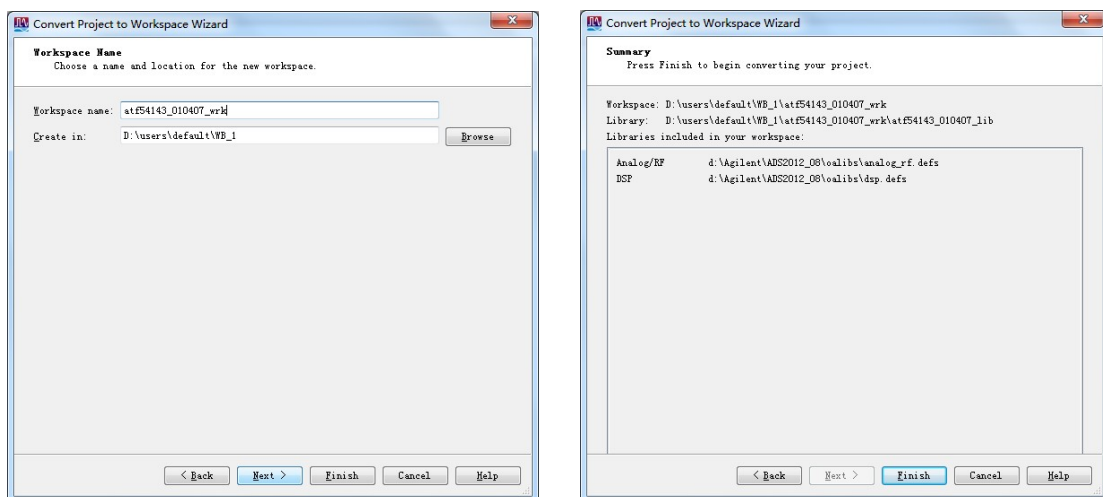


图 7.43 创建工作空间“atf54143\_wrk”对话框

## 2. 直流分析

本小节将确定晶体管的直流工作点。

(1) 在工作空间“atf54143\_wrk”下的主视窗中选择【File】→【New】→【Schematic】命令,弹出【New Schematic】对话框,在【New Schematic】对话框中,把原理图名称【cell】命名为“DC\_FET\_T”,以及选择【Schematic Design Templates】(原理图设计模板)项中的“DC\_FET\_T”模板,如图 7.44 所示。

(2) 单击【OK】按钮,完成创建宽带射频放大器晶体管工作点扫描的原理图,新建的原理图 DC\_FET\_T 自动打开。原理图 DC\_FET\_T 是带有模板的,模板为 FET Curve Tracer,带有这个模板的原理图可以自动完成晶体管工作点扫描的工作,原理图 DC\_FET\_T 如图 7.45 所示。

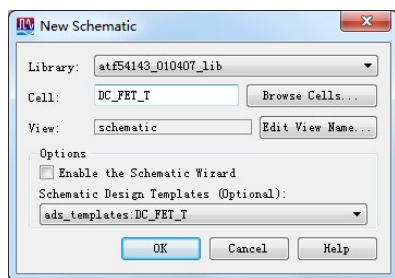


图 7.44 创建晶体管工作点扫描的原理图

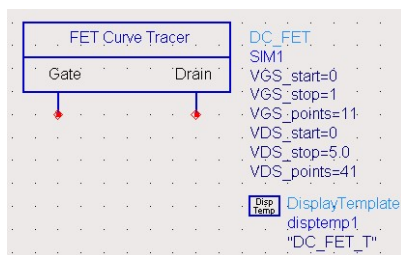



图 7.45 带有晶体管工作点扫描模板的原理图

(3) 单击原理图工具栏中的按钮,打开元件库,元件库窗口如图 7.46 所示。可以看到 ATF54143 的模型已经包含在工作空间 Workspace 里面,可直接调用。双击 ATF54143 元件,将其添加到原理图中。

(4) 设置 DC\_FET\_T 参数,可查阅 ATF54143 数据手册。

(5) 将元件 ATF54143 放置在原理图中, 并与模板中的元件按图 7.47 所示的方式连接起来成晶体管工作点扫描的电路。

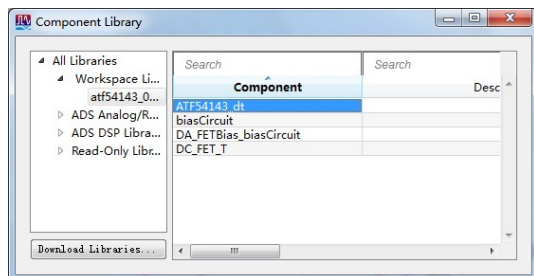


图 7.46 元件库窗口

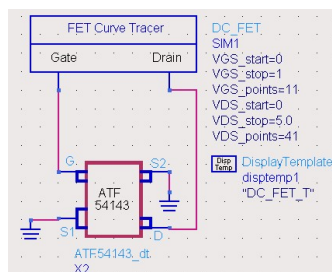



图 7.47 晶体管工作点扫描的电路

(6) 单击原理图工具栏中的  按钮, 执行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。由于使用的是仿真模板, 需要的仿真结果已经自动出现在数据显示视窗中, 如图 7.48 所示, 这是 ATF54143 直流特性图。

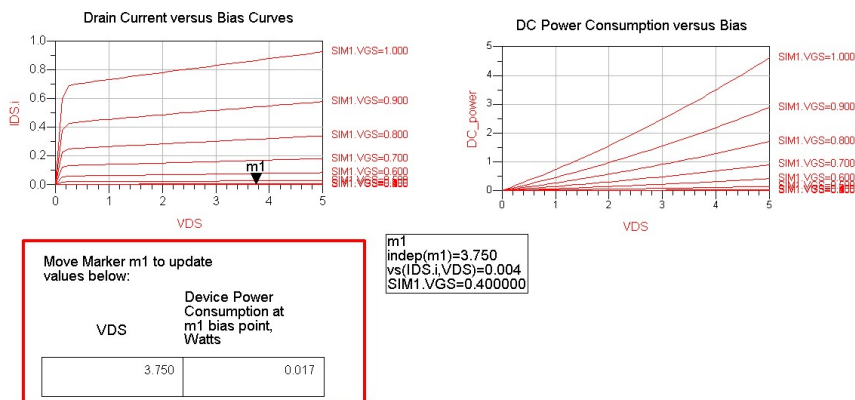


图 7.48 ATF54143 直流特性图

(7) 从 ATF54143 数据手册上可以看到噪声和  $V_{ds}$ 、 $I_{ds}$  的关系, 如图 7.49 所示, 从而确定晶体管工作点。从图中可以看出, 在 2GHz 时, 当  $V_{ds}=3V$  且  $I_{ds}=20mA$ ,  $F_{min}$  接近最小值, 此时增益大约为 16.3dB, 符合射频宽带放大器的设计要求。所以晶体管直流工作点就设为  $V_{ds}=3V$ ,  $I_{ds}=20mA$ 。

ATF-54143 Typical Performance Curve:

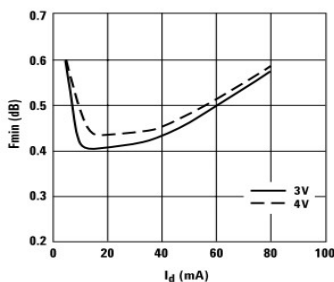
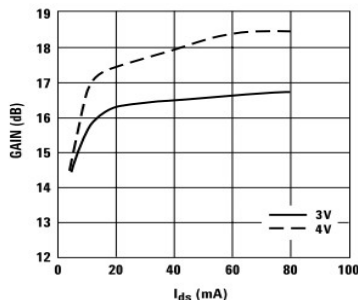
Figure 6. Fmin vs.  $I_{ds}$  and  $V_{ds}$  Tuned for Max OIP3 and Fmin at 2 GHz.Figure 8. Gain vs.  $I_{ds}$  and  $V_{ds}$  Tuned for Max OIP3 and Fmin at 2 GHz.

图 7.49 ATF54143 直流偏置曲线

### 3. 偏置电路的设计

(1) 创建新的原理图，其命名为“biasCircuit”，同时在原理图中放入 ATF54143 模型和“DA\_FETBias”控件。

(2) 放入直流电源，把各部件连接起来，如图 7.50 所示。

(3) 执行【Design Guide】→【Amplifier】命令，弹出放大器的设计向导对话框，选择【Transistor Bias Utility】，如图 7.51 所示。

(4) 单击【OK】按钮，弹出【Transistor Bias Utility】对话框，输入晶体管直流工作点  $V_{dd}=5V$ ， $V_{ds}=3V$ ， $I_{ds}=20mA$ （由于 ATF54143 上有两个栅极，每个栅极电流为  $I_{ds}=20mA$ ，相加起来  $I_d=40mA$ ），如图 7.52 所示。

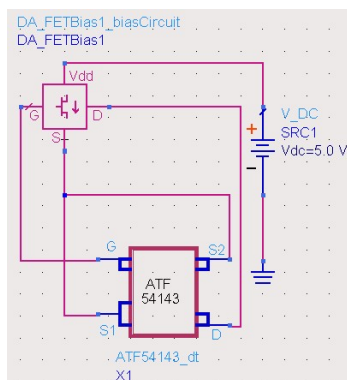


图 7.50 偏置电路原理图

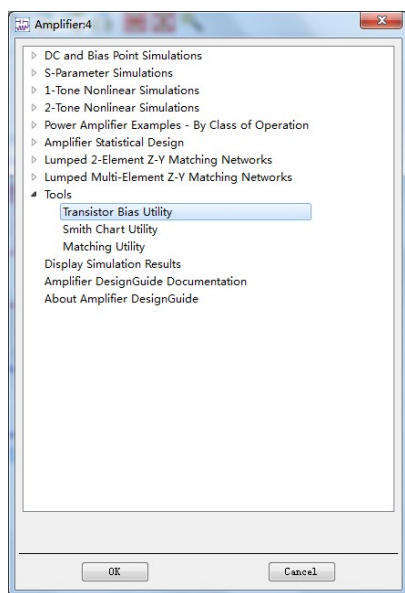


图 7.51 放大器设计向导对话框

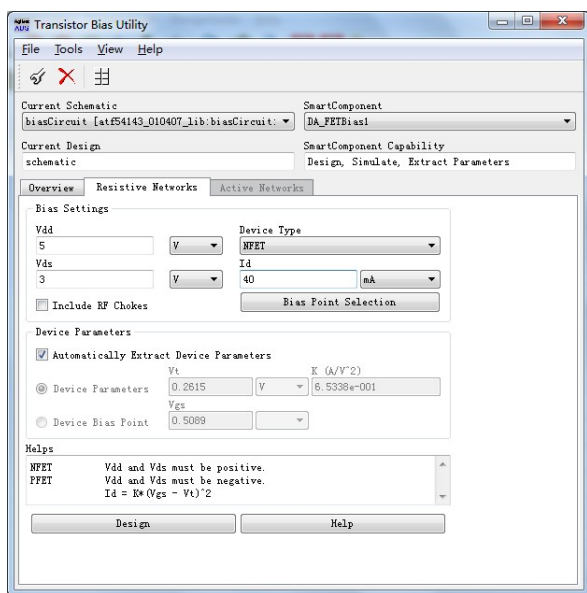



图 7.52 Transistor Bias Utility 的设置

(5) 单击【Design】按钮，弹出【Bias Network Selection】对话框，如图 7.53 所示。单击【OK】按钮后，自动生成一个偏置电路，这里选择第一个偏置网络，完成偏置网络的选择后，可以通过选择【DA\_FETBias\_1】控件，再单击图标来查看子电路，如图 7.54 所示。

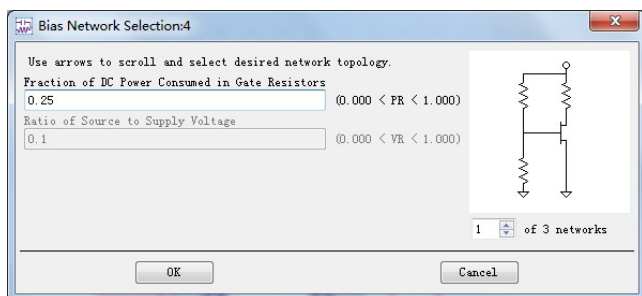



图 7.53 选择偏置电路类型

从子电路中可以看出, R2 和 R4 都不是常规标称值, 它们只是理论计算的结果, 后面的步骤中将会用相近的常规标称值代替。

(6) 单击原理图工具栏中的  按钮, 执行仿真, 仿真结束后, 执行【Simulation】→【Annotate DC Solution】命令, 可以看到仿真结果, 如图 7.55 所示。可以看到  $V_{ds}=3\text{V}$ ,  $I_{ds}=40\text{mA}$ , 这就是设置好的偏置结果。

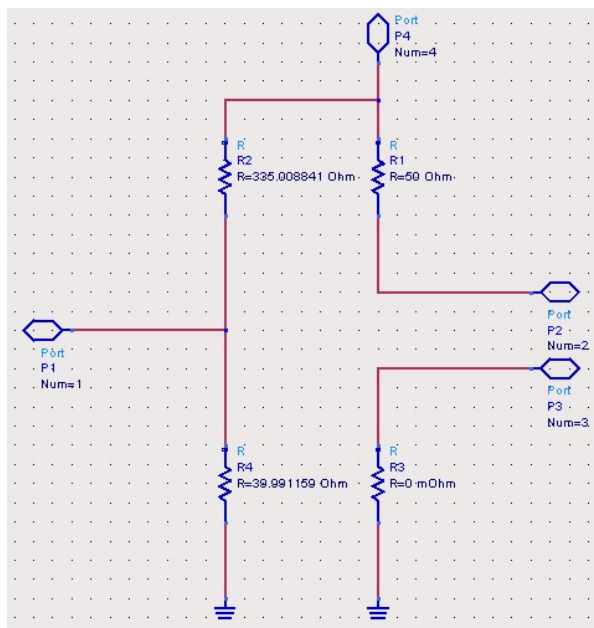


图 7.54 偏置子电路

(7) 再次创建新的原理图, 其命名为 “biasCircuit2”, 同时在原理图中放入 ATF54143 模型和各种元器件以及控件, 按照图 7.50 所示的画出偏置电路如图 7.56 所示。

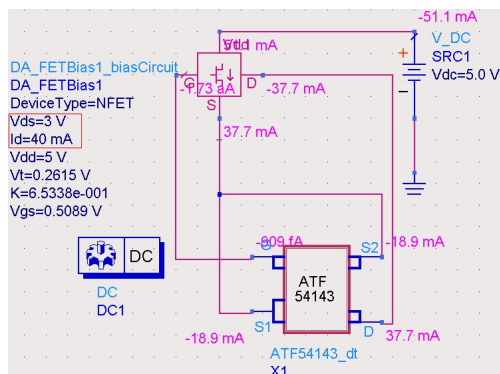


图 7.55 晶体管各端偏置电流

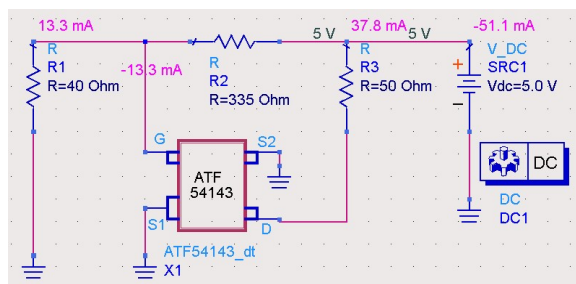


图 7.56 偏置电路原理图

#### 4. 稳定性分析

(1) 创建新的原理图, 其命名为 “WB\_1”, 同时在原理图中放入 ATF54143 模型和各种元器件以及控件, 画好电路如图 7.57 所示。

(2) 由于要进行 S 参数仿真, 需要添加负载终端 Term, 稳定系数 K 的控件 “StabFact”



(要求  $K>0$ ) 和最大增益的控件 “MaxGain”, 同时对仿真扫描起止频率进行相应的设置。另外在放大器的直流和交流通路之间要添加射频扼流电路, 它实质是一个无源低通电路, 使直流偏置信号能传输到晶体管引脚, 晶体管的射频信号频率很高, 实际中一般是一个电感, 这里先用【DC\_Feed】扼流电感代替, 由于直流偏置信号不能传到两端的负载终端 Term, 需要加隔直电容, 这里先用【DC\_Block】隔直电容代替。

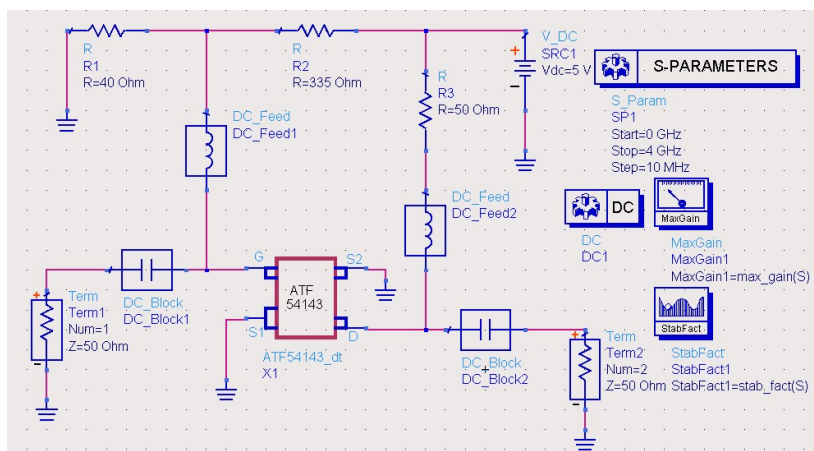



图 7.57 加入理想扼流的原理图

(3) 单击原理图工具栏中的  按钮, 执行仿真, 仿真结束后, 单击数据窗口左侧的图标, 在弹出的对话框中, 选择显示 “MaxGain1” 和 “StabFact1” 的曲线, 单击【OK】按钮。然后在 2.45GHz 处添加 marker 标记, 可以看到曲线上该频率点的精确数值, 如图 7.58 所示。

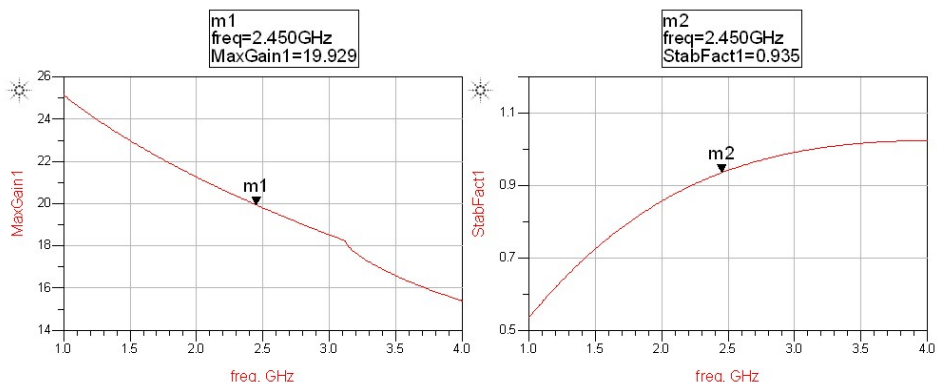


图 7.58 最大增益和稳定系数 K 曲线

从图 7.58 中可以看出, 在 2.45GHz 时, 最大增益为 19.929dB, 稳定系数  $K=0.935<1$ , 而由晶体管放大器理论可知, 只有绝对放大系数  $K>1$  时, 放大器电路才稳定, 所以接下来的目标是使系统稳定。

① 使系统稳定的办法有很多, 最常用的办法就是添加负反馈, 如图 7.59 所示, 在 ATF54143 的两个源极加小电感作为负反馈。为使其在整个工作频率范围内稳定, 要反复调节反馈电感, 经过调节,  $L_s$  取 0.45nH。仿真结果如图 7.60 所示。

② 由图 7.58 可以看出, 在 2.45GHz 处及其附近频率处, 稳定系数  $K$  的值都大于 1, 符合



稳定性要求。接下来要把理想的 DC\_Feed 元件改成实际的器件，这个例子选用日本村田公司 (MuRata) 的电容和电感。由于 ADS 没有自带 MuRata 公司的相关仿真元器件，所以需要到其网站上下载【ADS Design Kits】。对元件包进行释放安装后，电源部分用一个扼流电感“LGQ18”和一个旁路电容“GRM18”，对射频信号进行阻隔，如图 7.61 所示。

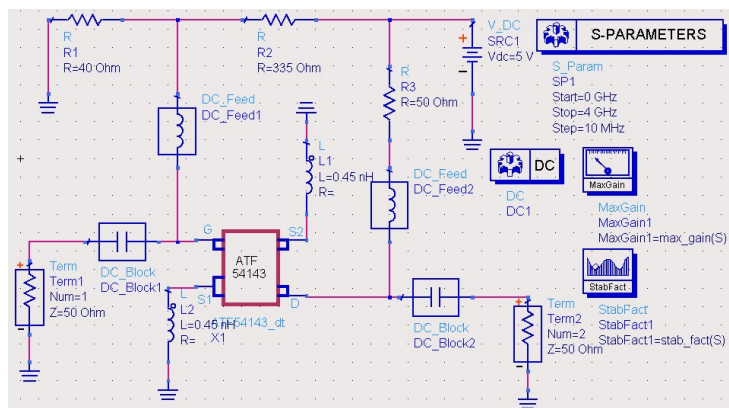


图 7.59 添加负反馈后的原理图

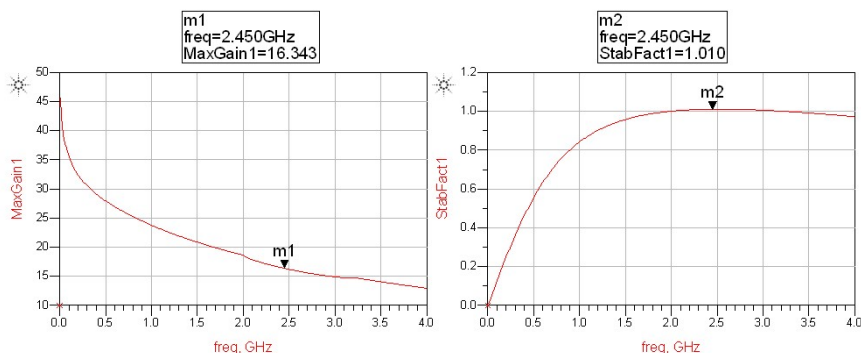


图 7.60 调节 Ls 后的最大增益和稳定系数 K 曲线

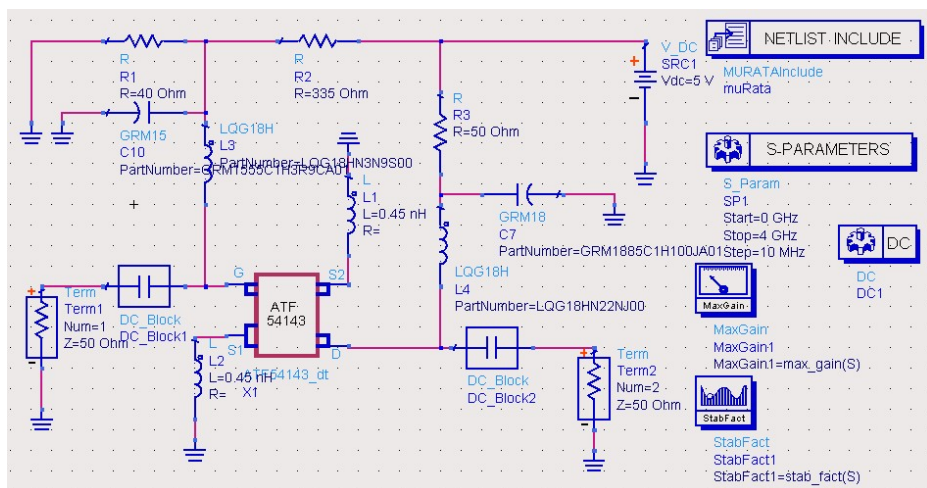


图 7.61 加入 MuRata 电容和电感的原理图

③ 分别双击 MuRata 电容和电感，在弹出的对话框中，选择【Parameter Entry Mode】下拉菜单，可以在这里选择不同的电容值和电感值，如图 7.62 所示。在这个电路中，输入端旁路电容为 10pF，串联电感值为 3.9nH，输出端旁路电容为 10pF，串联电感值为 22nH。仿真结果如图 7.63 所示。

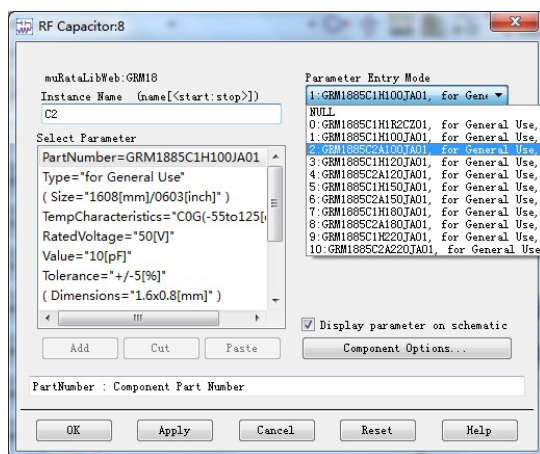


图 7.62 选择 MuRata 电容值

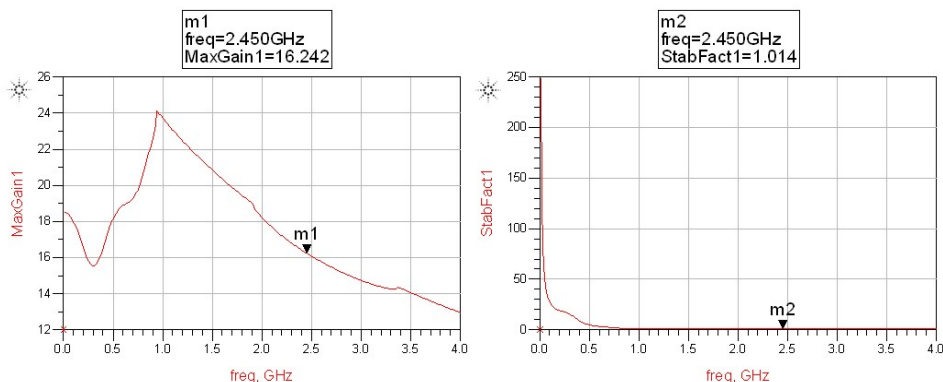



图 7.63 加入 MuRata 电容和电感后的仿真结果

从图 7.63 中可以看出，电路在低频部分已经很稳定。由于 ATF54143 源极的两个电感的值太小，同时若两个电感值稍微改变，就会对整个电路的稳定性产生很大的影响，而在实际电路中，用实际的分立电感在焊接的时候也会产生不确定因素，因此要把电感换成微带线的形式。

首先通过给定电感值算出等效传输线的长度，然后在【TLines-Microstrip】元器件库中选择【Msub】控件和微带线【MLSC】，添加到原理图中，ATF54143 的源极微带线宽为 0.5mm，其特征阻抗为 87.05Ω，最后计算出长度约为 0.7mm。

把晶体管两端的【DC\_Block】理想元器件换成真实的器件，即用 MuRata 电容，两个电容都选用“GRM18”系列，电容值为 22pF，此时整个原理图如图 7.64 所示。

单击原理图工具栏中的  按钮，执行仿真，仿真结果如图 7.65 所示，从图中可以看出，电路全部换成真实器件后，其增益和稳定系数依然很好，符合设计要求。

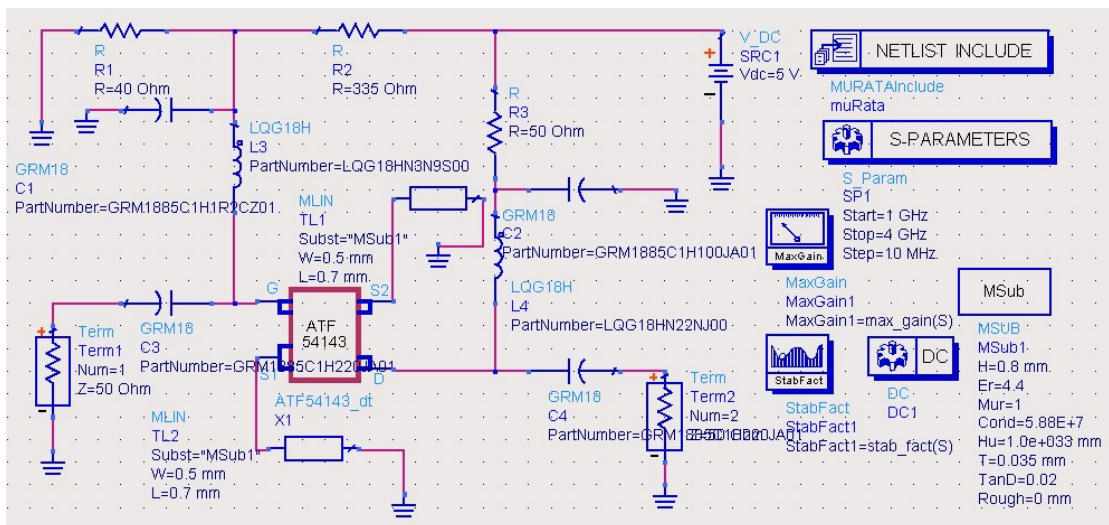


图 7.64 稳定性分析的完整原理图

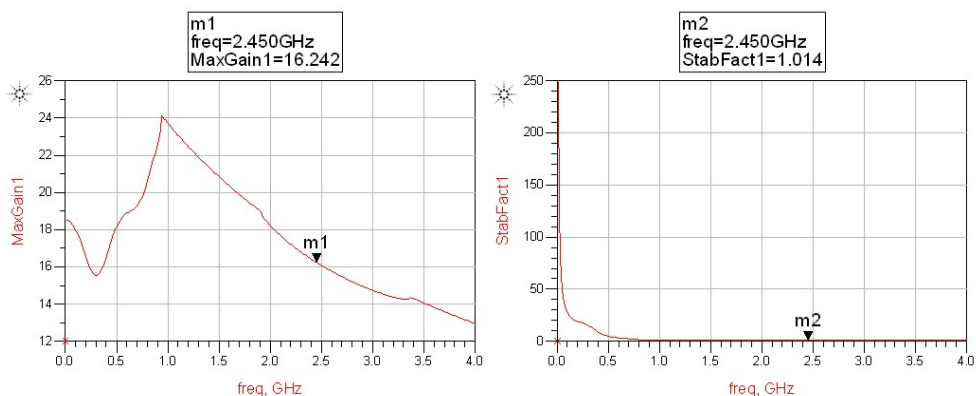


图 7.65 电路最大增益和稳定系数 K 曲线

## 5. 输入匹配设计

对于射频宽带放大器，输入/输出匹配电路通常采用分布参数元件，这种类型的匹配网络由几段串联或并联的微带线组成。为了在整个频段内得到良好的匹配效果，一般先选定中心频率进行匹配电路设计，然后再对电路在整个频带内进行微调优化，输入端通常采用最小噪声匹配的方式，步骤如下。

(1) 在上一小节的数据显示窗口中，单击面板上的 图标，弹出【Enter Equation】对话框，依次编辑以下等式，如图 7.66 所示。

其中第一个等式表示返回值是前面定义的 m1 频率，即为 2.45GHz，第二个等式表示返回噪声系数圆，第三个等式表示返回增益圆。

(2) 在数据显示窗口中画出增益圆和噪声圆，单击面板上的 图标，弹出【Plot Traces & Attributes】对话框，在【Datasets and Equations】下拉列表中选择【Equations】项，然后选择【GaCircle】和【circleData】，分别单击【Add】按钮，将它们添加到【Trace Options】中，如图 7.67 所示。

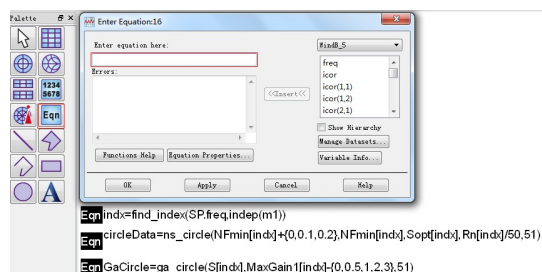


图 7.66 编辑等式

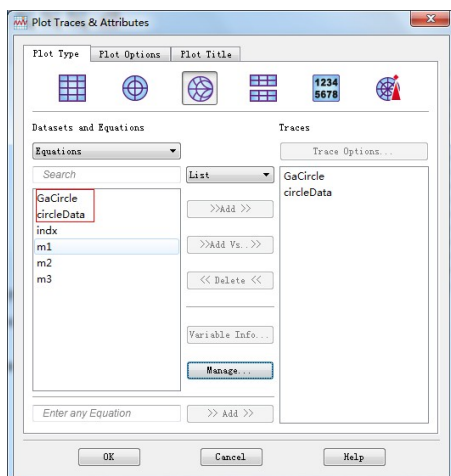


图 7.67 【Traces &amp; Attributes】对话框设置

(3) 单击【OK】按钮，给曲线添加 marker 标记，得到 Smith 圆图，如图 7.68 所示，其中 m4 和 m6 点在 GaCircle 圆上，m5 点在 circleData 圆上。m4 是射频宽带放大器有最大增益时的输入端阻抗，此时可获得增益为 16.93dB，m5 为射频宽带放大器有最小噪声系数时的输入端阻抗，此时可获得最小噪声指数为 0.428dB，在设计时要做综合考虑。

对于射频宽带放大器，第一级放大首先要考虑的是噪声系数。根据匹配的相关理论，采用微带线匹配的方式，各段微带线的特性阻抗都为  $50\Omega$ ，以减小匹配电路的复杂程度。在确定第一级放大器输入匹配电路后，可以得到对应输出阻抗。

(4) 在原理图中添加 Smith 圆图匹配工具【DA\_SmithChartMatch】，双击【DA\_SmithChartMatch】图标，弹出【Smith Chart Matching Network】对话框，参数设置如图 7.69 所示。

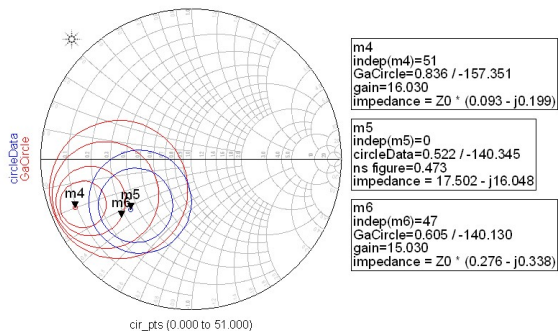


图 7.68 Smith 圆图相关参数

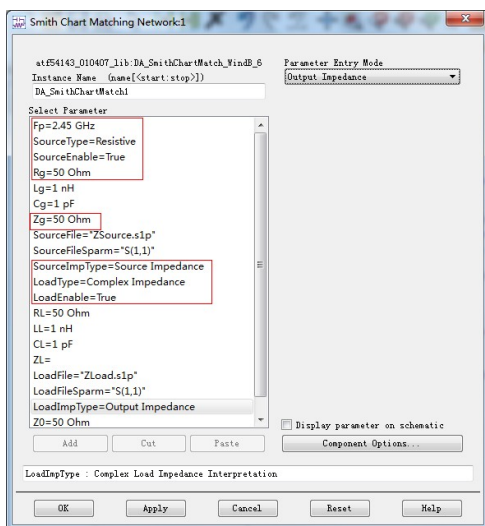


图 7.69 【Smith Chart Matching】参数设置

(5) 执行【DesignGuide】→【Amplifier】命令，在弹出的对话框中选择【Smith Chart Utility】项，单击【OK】按钮，弹出【Smith Chart Utility】窗口，如图 7.70 所示。在【SmartComponent】中软件会自动选择当前的【Smith Chart Matching】控件，即【DA\_SmithChartMatch1】。



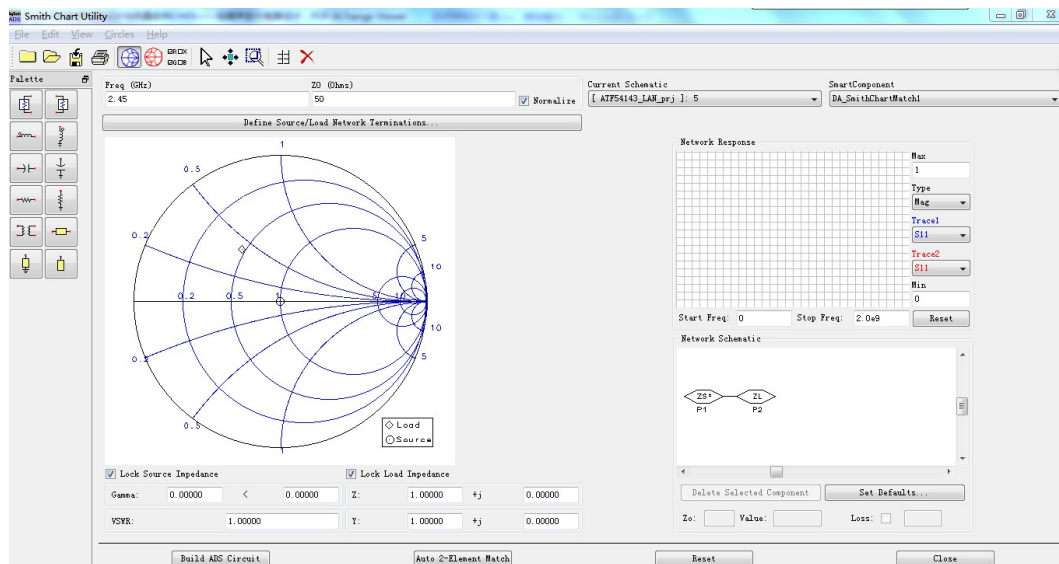


图 7.70 【Smith Chart Utility】窗口

(6) 单击【Define Source/Load Network Terminations】按钮，弹出【Network Terminations】对话框，在【Network Terminations】对话框中，其参数设置如图 7.71 所示。

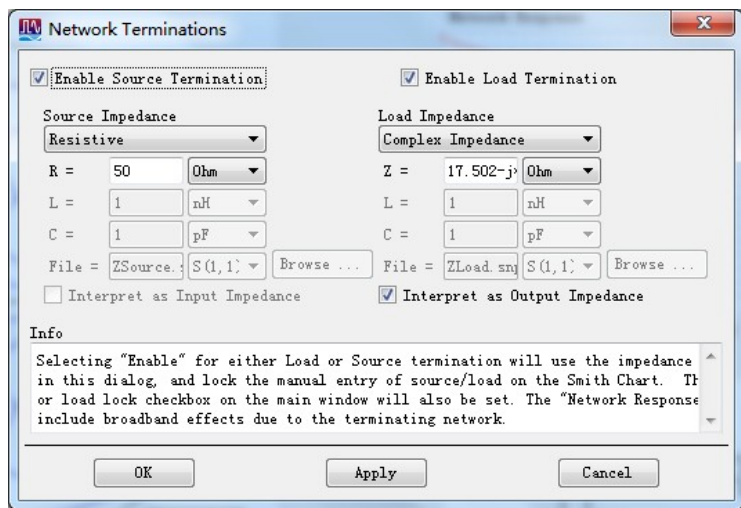



图 7.71 设置 Smith Chart Utility 输入阻抗

(7) 设置完成后依次单击【Apply】和【OK】按钮，结果如图 7.72 所示。再单击【Build ADS Circuit】按钮，即生成相应的电路，如图 7.73 所示。

从图 7.73 中可以看出，在 circleData 圆里，m5 点的阻抗正好匹配到  $50\Omega$ ，此时整个电路的噪声系数最小，已达到最优化的程度。

(8) 单击原理图工具栏中的  按钮，执行仿真，如图 7.74 所示。

(9) 在晶体管输入端的隔直电容会导致电路结构复杂，所以需要把隔直电容移到源端，即把隔直电容移到输入匹配网络和源端 Term 之间，同时把匹配子网络复制到原理图中，如图 7.75 所示。而此时噪声最优点已偏离  $50\Omega$ ，需要调节微带线的长度来补偿。

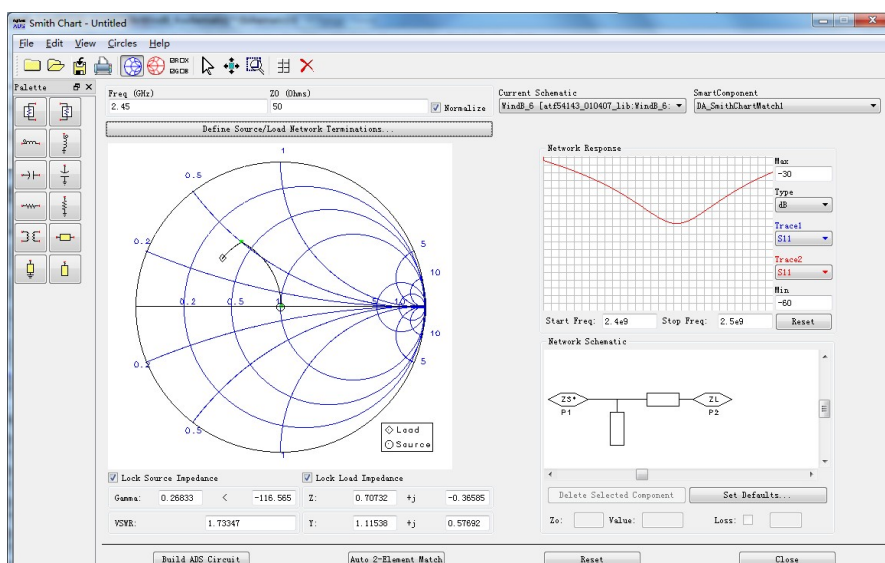


图 7.72 设置完成的 Smith Chart Utility 输入阻抗

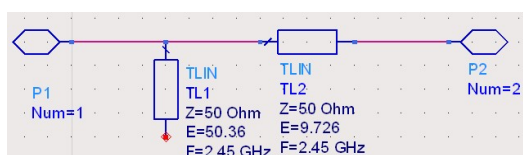


图 7.73 匹配子电路

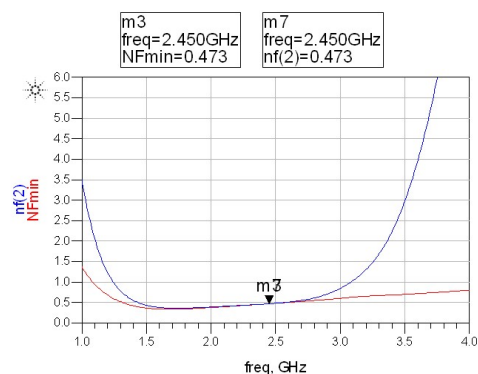


图 7.74 仿真结果

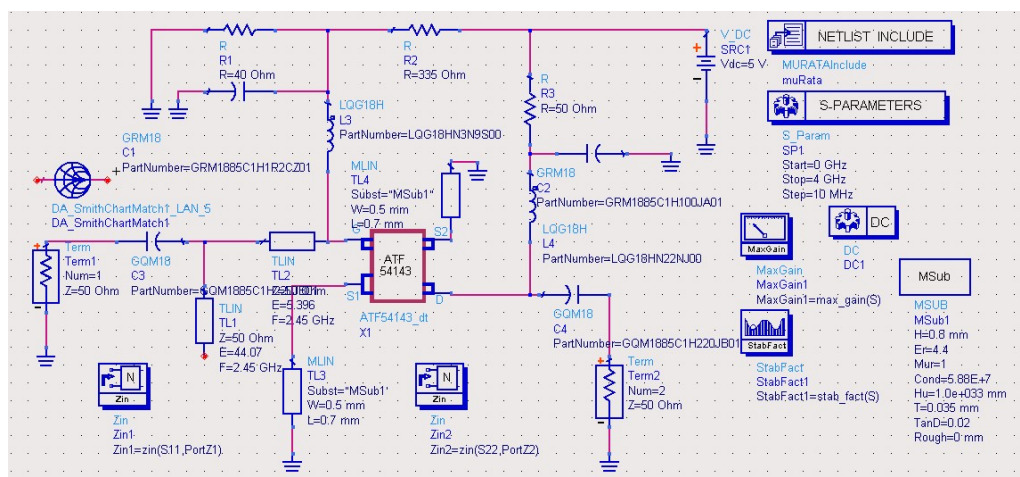


图 7.75 做好输入匹配的原理图

(10) 在这里可以使用 Tuning 工具来调节两段传输线的长度 (显示的是微带线的电长度 E), 双击传输线, 在该对话框中单击 **【Tune/Opt/ Stat/DOE Setup】** 按钮打开 Tuning 功能, 进行如图 7.76 所示的参数设置, 设置完成后分别单击 **【OK】** 按钮

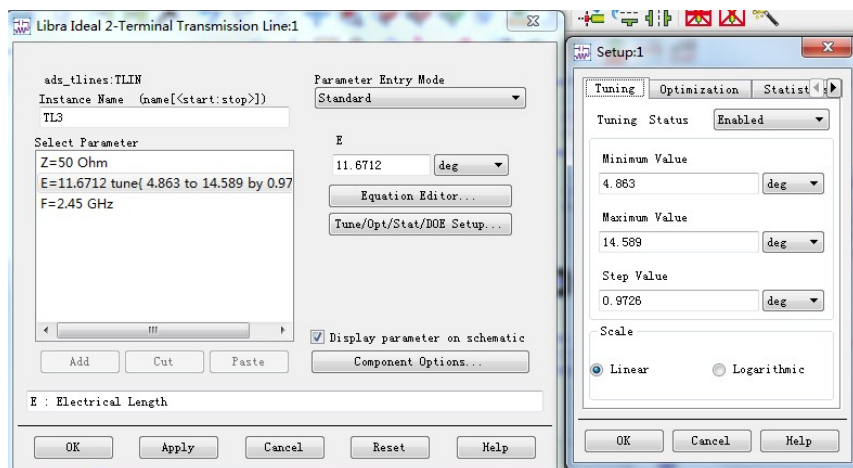


图 7.76 **【Tune/Opt/Stat/DOE Setup】** 参数设置

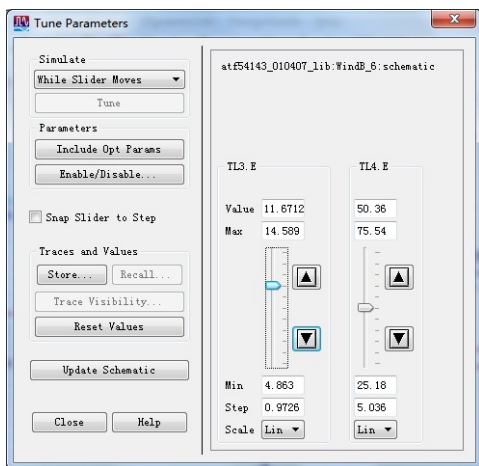




图 7.77 Tuning 工具调节


(11) 单击  图标, 开始 Tuning, 如图 7.77 所示。此时可以观察数据显示窗口的相关曲线变化, 以达到理想的效果。运行仿真的结果如图 7.78 所示。

## 6. 最大增益的输出匹配设计

(1) 在 S 参数仿真元件面板上, 选择输出阻抗测量控件  $Z_{in}$  插入原理图中, 输出阻抗测量控件  $Z_{in}$ , 如图 7.79 所示。

(2) 单击原理图工具栏中的  按钮, 执行仿真, 仿真结束后, 数据显示视窗自动弹出。在数据显示视窗中, 单击数据显示方式面板中的数据列表图标, 插入数据显示区, 显示输出阻抗  $Z_{in2}$  的数据, 输出阻抗  $Z_{in2}$  的数据是用幅值和相角表示的, 需要将输出阻抗  $Z_{in2}$  的数据改写为实

部和虚部。

(3) 在数据框显示框中单击  图标, 弹出 **【Plot Traces & Attributes】** 对话框, 在 **【Plot Traces & Attributes】** 对话框中, 双击 **【 $Z_{in2}$ 】**, 又弹出 **【Traces Option】** 对话框, 在 **【Traces Option】** 对话框中选择 **【Real/Imaginary】** 项, 如图 7.80 所示。

(4) 用实部和虚部表示的输出阻抗  $Z_{in2}$  曲线, 如图 7.81 所示。

由图 7.81 可以看出, 在中心频率 2.45GHz 处, 输入阻抗  $Z_{in2}=52.040-j*36.231$ 。为了使射频宽带放大器达到最大增益, 输出匹配电路需要把  $50\Omega$  匹配到  $Z_{in2}$  的共轭。

(5) 同样可用 Smith 圆图匹配工具 **【DA\_SmithChartMatch】** 来实现输出端的匹配电路, 在原理图中重新添加 Smith 圆图匹配工具 **【DA\_SmithChartMatch】**, 如图 7.82 所示。



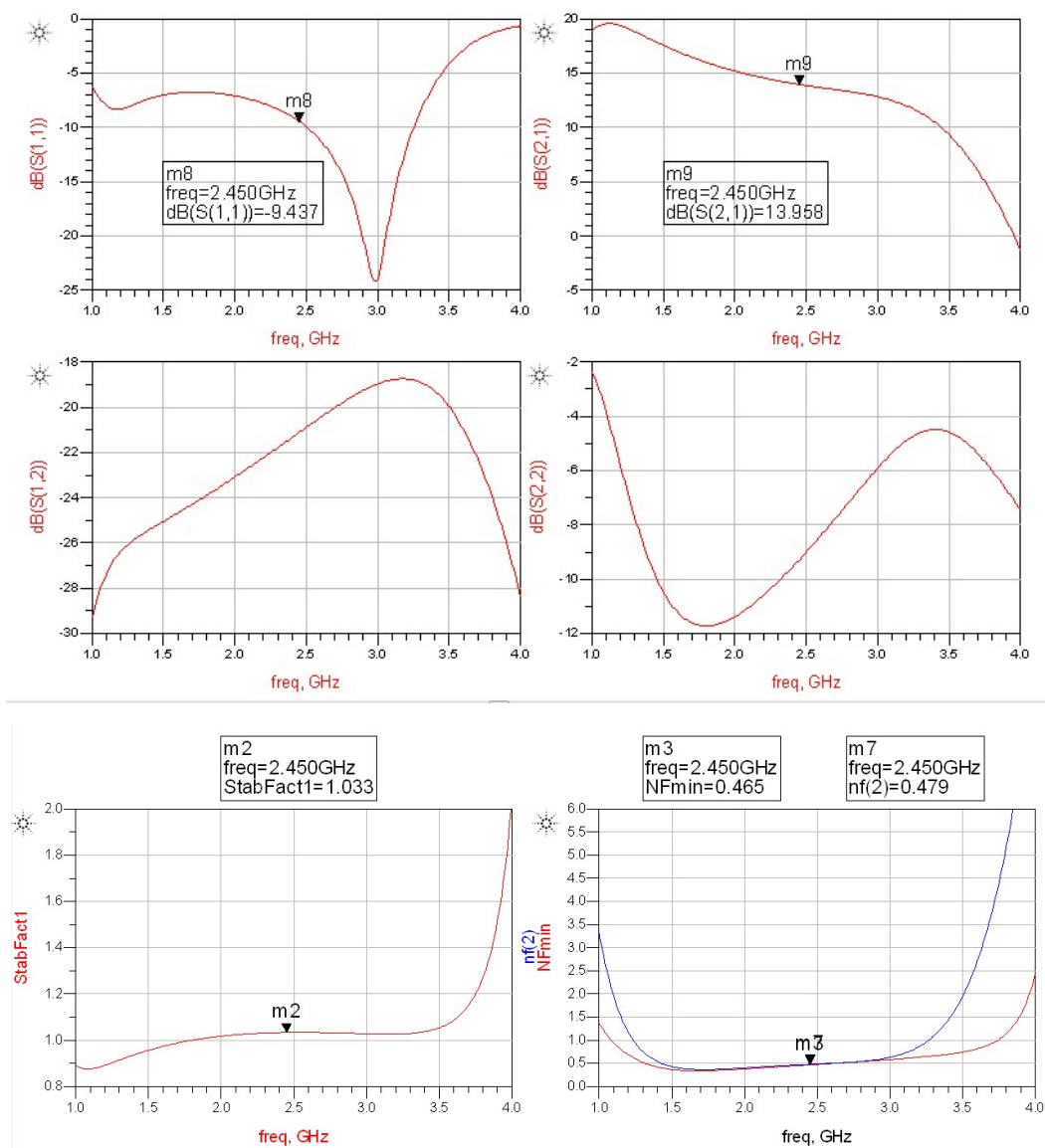


图 7.78 做好输入匹配的仿真结果

(6) 双击【DA\_SmithChartMatch】图标，弹出【Smith Chart Matching Network】对话框，参数设置如图 7.83 所示。

(7) 执行【DesignGuide】→【Amplifier】命令，在弹出的对话框中选择【Smith Chart Utility】项，单击【OK】按钮，弹出【Smith Chart Utility】窗口，单击【Define Source/Load Network Terminations】按钮，弹出【Network Terminations】对话框，在【Network Terminations】对话框中，其参数设置如图 7.84 所示。

(8) 设置完成后依次单击【Apply】和【OK】按钮，结果如图 7.85 所示。仍用微带线进行匹配，单击【Build ADS Circuit】按钮，即生成相应的电路，如图 7.86 所示。

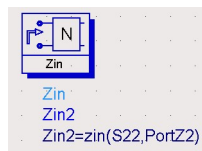


图 7.79 输出阻抗测量控件

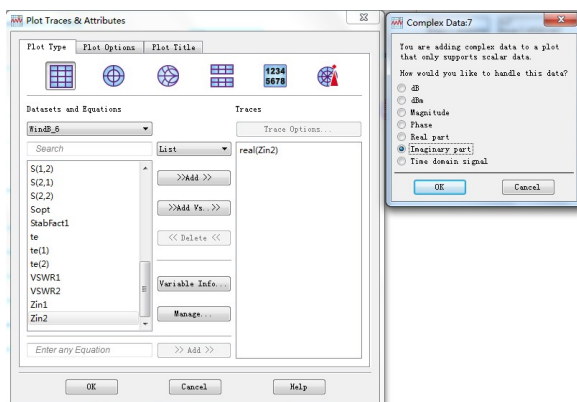


图 7.80 输出阻抗的数据改写为实部和虚部

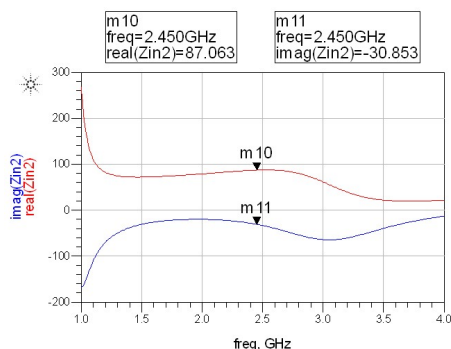


图 7.81 输出阻抗曲线

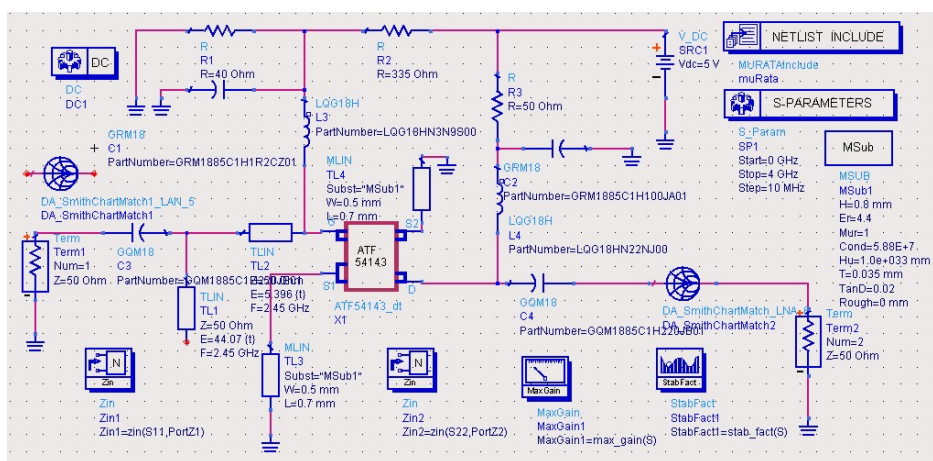


图 7.82 用匹配工具【DA\_SmithChartMatch】来实现输出端的匹配电路

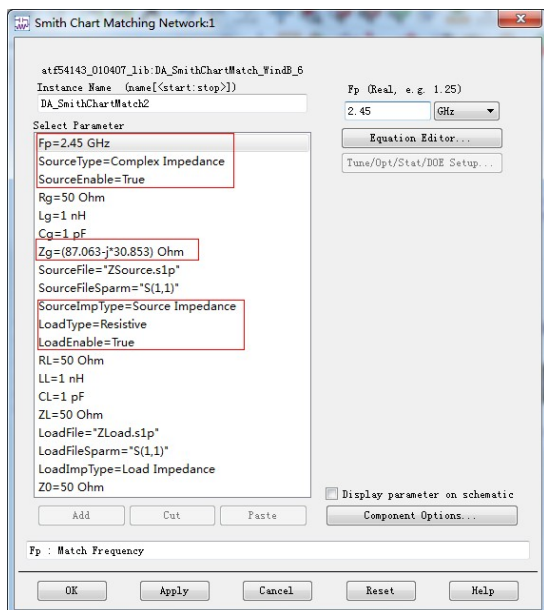


图 7.83 设置输出【Smith Chart Matching】参数

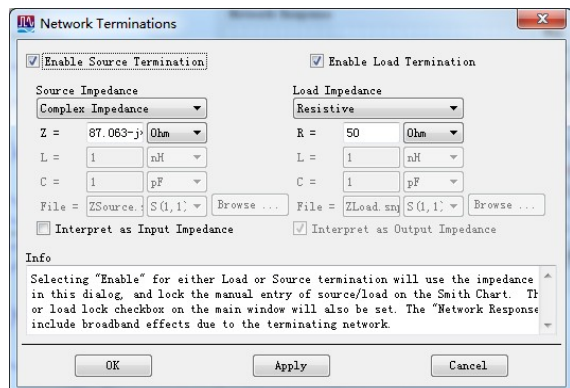
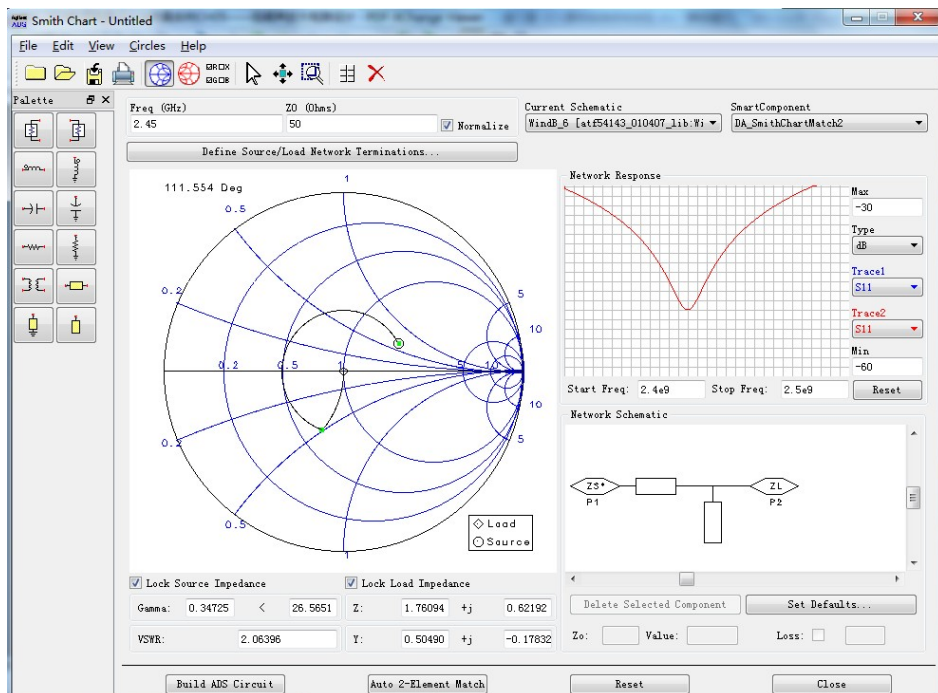


图 7.84 设置【Smith Chart Utility】输出阻抗



(9) 把 DA\_SmithChartMatch2 的子电路复制到原理图中, 并把输出端的耦合电容放到输出端, 如图 7.87 所示。

(10) 运行仿真, 结果如图 7.88 所示。

从上图可以看出，输入和输出回波损耗在 2.45GHz 处都小于 -7dB，增益约为 14dB，符合设计要求。当然可以使用 Tuning 工具来调节，如图 7.89 所示。

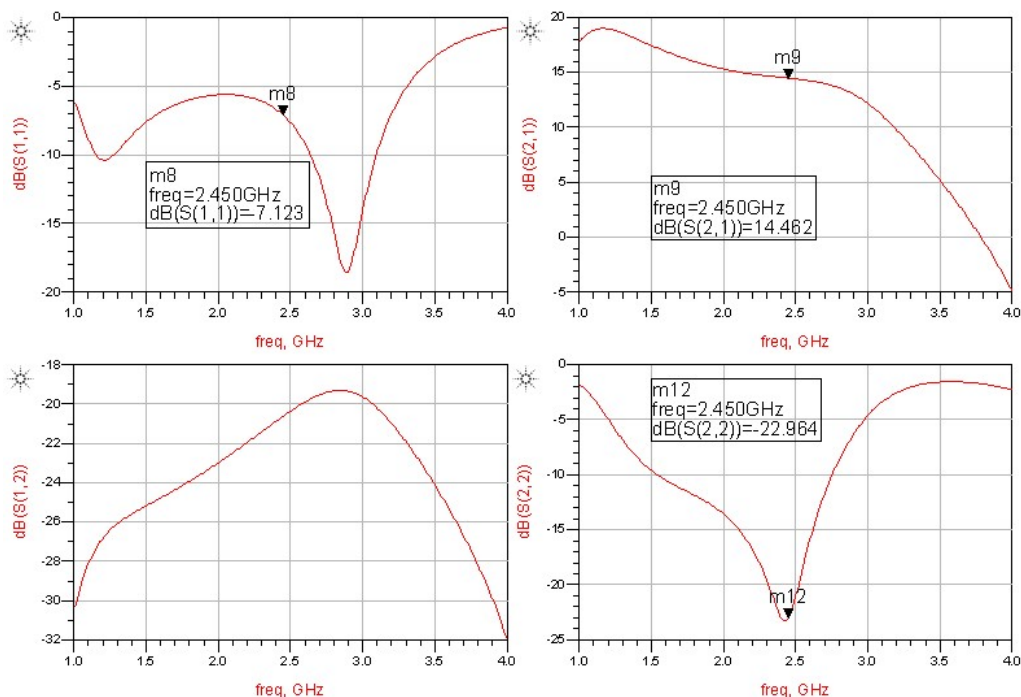


图 7.88 仿真结果

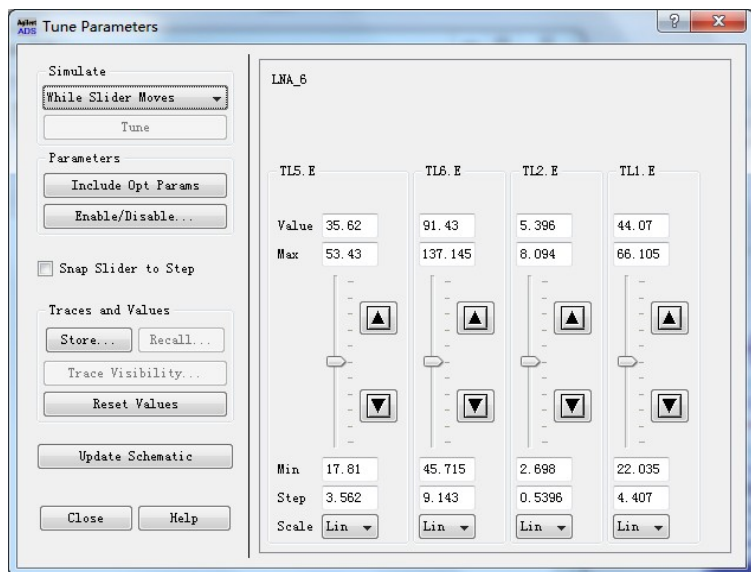


图 7.89 Tuning 工具调节

(11) 使用 Tuning 工具调节后，运行仿真，如图 7.90 所示。

## 7. 匹配网络的实现和原理图仿真

前面用到的都是理想微带线，其参数只有特性阻抗、电长度和频率，接下来需要把它转换成实际的标明物理长宽的微带线。可以利用【LineCalc】工具计算出物理长度，单击【LineCalc】计算窗口中的【Synthesize】按钮，如图 7.91 所示。



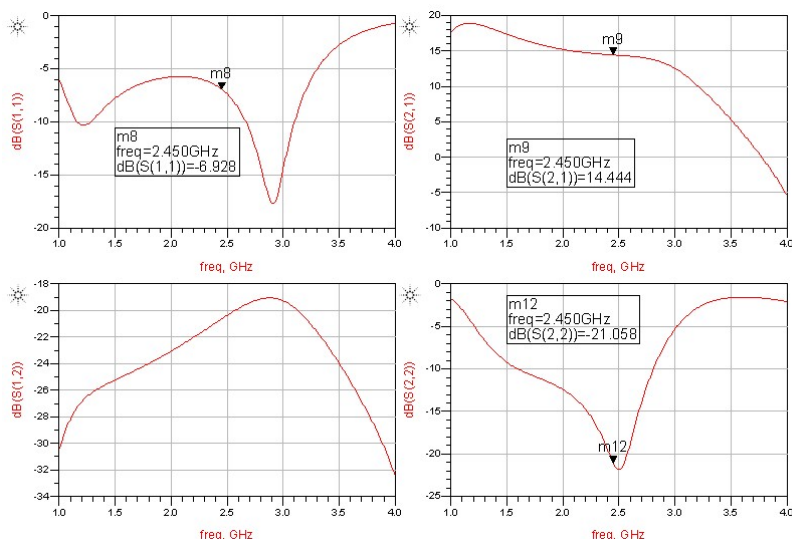


图 7.90 Tuning 工具调节后的仿真结果

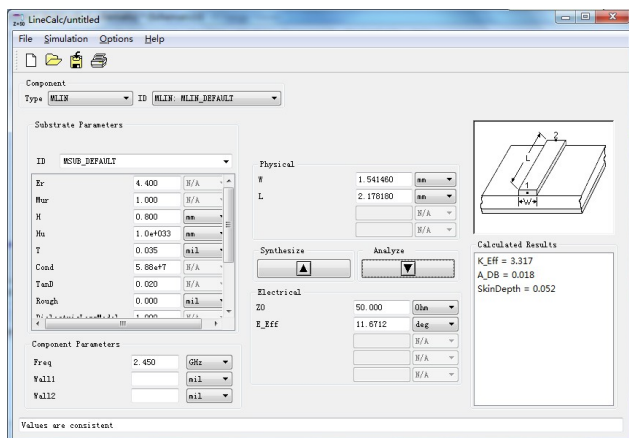


图 7.91 微带线尺寸计算窗口

返回原理图，把所有理想微带线转换成实际的标明物理长宽的微带线，如图 7.92 所示。

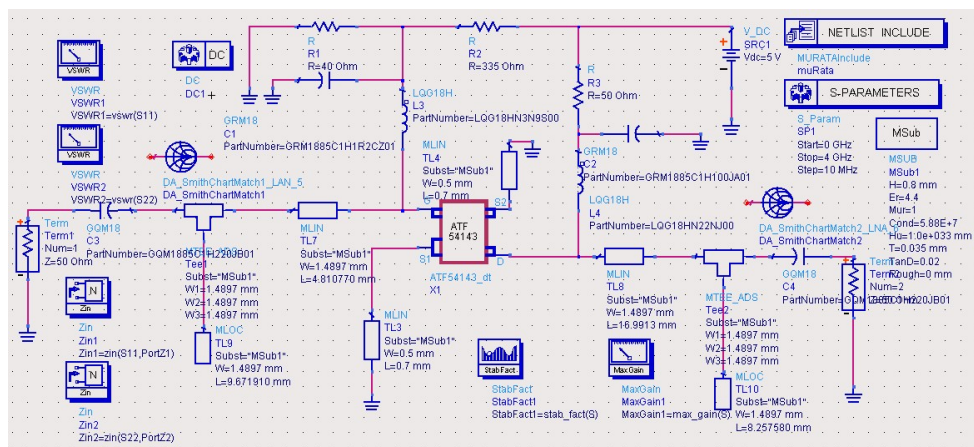



图 7.92 把理想微带线转换成实际微带线的原理图

单击原理图工具栏中的按钮, 执行仿真, 仿真结果如图 7.93 所示。

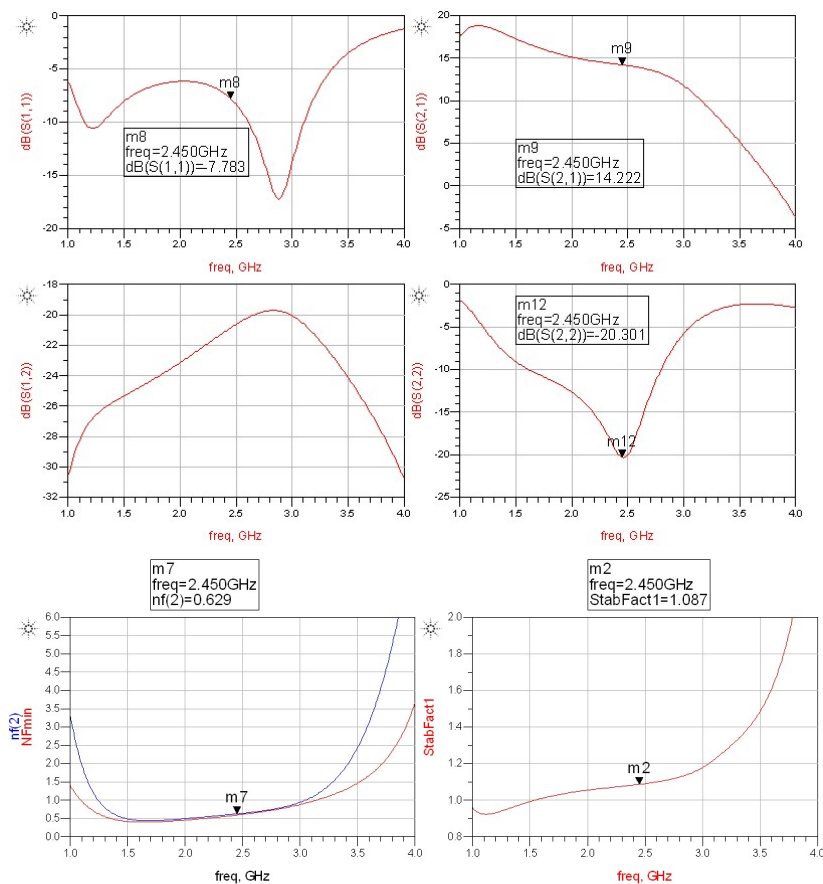


图 7.93 仿真结果

从上图可以看出, 在 2.45GHz 处, 增益为 14dB, 噪声系数小于 0.7dB, 整个电路无条件稳定。

在实际电路中, 通常在电源处需要添加几个分立电容来对电源进行去耦。一般从电源开始加两个或者三个电容, 包括一个大电容和一个小电容, 这里加入三个电容, 从电源开始分别为  $1\mu\text{F}$ 、 $0.01\mu\text{F}$ 、 $10\text{pF}$ 。其总的原理图如图 7.94 所示。

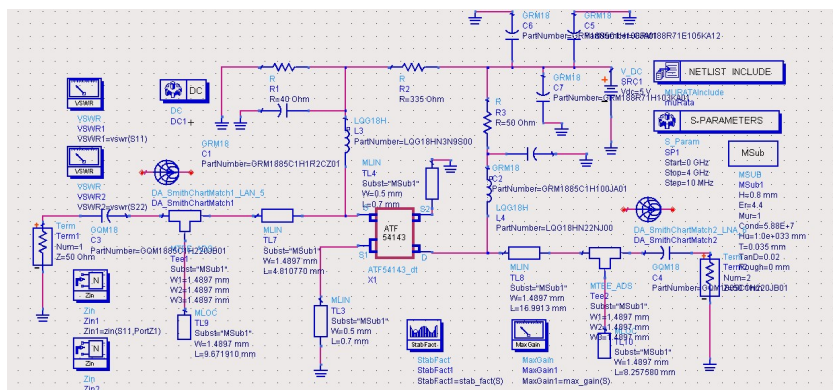



图 7.94 添加去耦电容后的原理图

再次单击原理图工具栏中的  按钮, 执行仿真, 仿真结果如图 7.95 所示。

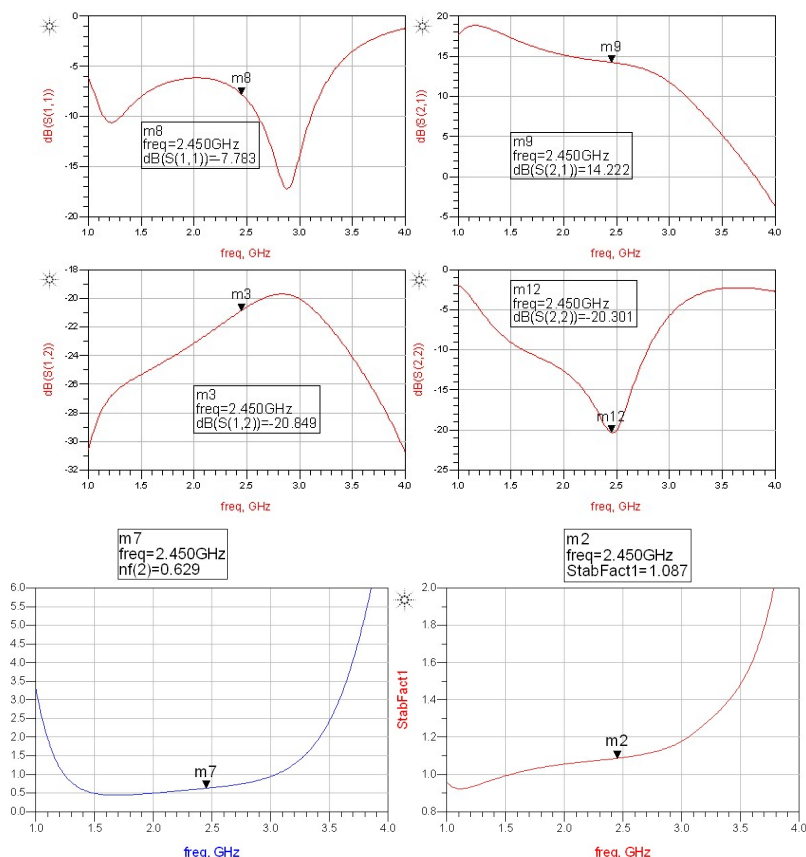


图 7.95 仿真结果

从上图中可以看出, 在电源加了去耦电容之后性能同样达到要求。上述参数满足技术指标, 表明封装模型射频宽带放大器的设计仿真任务完成。

## 习题

1. 通信系统综合实验的仿真例子还有很多, 如近几年流行的短距离无线通信技术, 包括蓝牙、Wi-Fi、Zigbee 技术等。请读者查阅有关资料, 对此方面做进一步学习。
2. 在通信电路射频收发系统中, 增益预算是一个重要指标, 其对系统性能有何影响?
3. 如果要减小通信电路的射频宽带放大器尺寸, 可以采取哪些措施?
4. 通信电路的射频宽带放大器的匹配电路的好坏对整体性能影响很大, 与其他匹配电路有何不同之处?
5. 请读者将上述系统综合实验的原理图仿真转化为版图仿真, 并总结版图仿真所要注意的问题。



## 参 考 文 献

- [1] 张肇仪, 徐承和, 祝西里译. Devendra K.Misra (美) 著. 射频与微波通信电路——分析与设计 (第 2 版), 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] 刘丽军, 邓子云. 物联网技术与应用. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [3] 黄玉兰. 射频电路理论与设计. 北京: 人民邮电出版社, 2008.